Nº D'ORDRE au C.N.R.S
A.C

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE ROUEN

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

Pierre MICHE

Contribution à la réalisation d'un spectromètre Fabry Pérot intégral. Mise au point d'un système de contrôle assurant le déplacement en synchronisme des bandes passantes du pré-monochromateur à réseau et de l'analyseur Fabry Pérot.

Soutenue le 28 JUIN 1974

MM. A. COLOMBANI,	Doyen honoraire, Professeur à l'Université de ROUEN	Président
P. VALENTIN,	Professeur à l'Université de ROUEN	Examinateur
J.M. HELBERT,	Professeur à l'Université de ROUEN	"
P. LAFORIE,	Professeur à l'I.N.S.C.I.R.	Membre invité

Nº D'ORDRE au C.N.R.S
A.C

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE ROUEN

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

Pierre MICHE

Contribution à la réalisation d'un spectromètre Fabry Pérot intégral. Mise au point d'un système de contrôle assurant le déplacement en synchronisme des bandes passantes du pré-monochromateur à réseau et de l'analyseur Fabry Pérot.

Soutenue le 28 JUIN 1974

MM. A. COLOMBANI,	Doyen honoraire, Professeur à l'Université de ROUEN	Président
P. VALENTIN,	Professeur à l'Université de ROUEN	Examinateur
J.M. HELBERT,	Professeur à l'Université de ROUEN	"
P. LAFORIE,	Professeur à l'I. N. S. C. I. R.	Membre invité

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Je remercie Monsieur DARRIGO, directeur de l'Institut National Supérieur de Chimie Industrielle de Rouen, de m'avoir permis de réaliser ce travail.

Je prie Monsieur le Doyen honoraire COLOMBANI de recevoir l'expression de ma respectueuse gratitude pour avoir accepté de présider le jury.

J'exprime à Monsieur le Professeur VALENTIN ma plus vive reconnaissance pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail en acceptant d'être membre du Jury.

Que Monsieur le Professeur HELBERT, qui a dirigé cette étude reçoive ici toute ma gratitude.

Je remercie tout particulièrement Monsieur LAFORIE pour l'aide efficace qu'il m'a apportée au cours de ce travail.

Je remercie également Monsieur LETAILLEUR qui a accepté la charge de l'usinage des pièces de l'installation.

Je remercie enfin tous ceux, chercheurs et personnel de laboratoires, qui de près ou de loin, m'ont assisté dans la réalisation de ce travail.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41544711_0004

A ma femme

A mes Parents

SOMMAIRE

INTRODUCTION 1

Première partie : Etude théorique

Chapitre I : conception générale spectromètre

I : L'élément résolvant 3

II : Le prémonochromateur 8

III : Exploration du spectre 11

Chapitre II : Etude du système explorateur

I : Balayage du réseau 12

II : Balayage du Fabry-Pérot 13

III : Balayage de l'ensemble monochromateur Etude d'un cycle élémentaire 14

IV : Calcul des variations d'indice simplification du cycle. 18

Chapitre III : Etude du contrôle de pression

I : Analyse du système de contrôle 24

II : Contrôle des variations d'indice au cours du cycle : calcul du nombre de franges 27

III : Contrôle de la vitesse de balayage 28

Deuxième Partie : Réalisation expérimentale

Chapitre I : Fonctionnement général

I : Description de l'installation 35

II :	Fonctionnement au cours du cycle	39
Chapitre II :	Comptage des franges	
I :	Elaboration du signal Michelson	42
II :	impulsions de comptage	45 bis
III :	sélection compte-décompte	48
Chapitre III :	Asservissement du balayage en nombre d'ondes	
I :	Schéma général de l'asservissement	55
II :	Elaboration du signal d'erreur	58
III :	Chaîne d'action	64
IV :	Correction somme	67
V :	Asservissement complet	72
Chapitre IV :	Dispositifs annexes	
I :	Bloc de calcul	76
II :	Repositionnement de la vanne en fin de cycle	85
Chapitre V :	Résultats	
I :	Technique de la mesure de linéarisation	89
II :	Contrôle de la linéarisation	92
Conclusion		100
Annexe 1		A1
Annexe 2		A3

PRINCIPALES NOTATIONS UTILISEES

$A(\sigma)$	:	fonction transmission d'un F.P. parfait.
a	:	largeur de $A(\sigma)$
$B(\sigma)$	:	fonction représentative du profil spectral.
Cq	:	nombre d'unités de temps τ comptées dans une période de référence Tq ou T'q.
D	:	définience absolue.
D_R	:	définience relative
$D(\sigma)$	:	fonction défauts de surface.
d	:	largeur de $D(\sigma)$
e	:	épaisseur du F.P.
e'	:	épaisseur totale des fenêtres du Michelson.
$F(\sigma)$	:	fonction diaphragme
f	:	largeur de $F(\sigma)$
L	:	longueur du bras de mesure du Michelson.
L'	:	largeur du bras de référence du Michelson.
n et n'	:	indice du gaz dans l'enceinte du F.P.
n_o	:	indice du vide.
n_v	:	indice du verre.
N_D	:	finesse limite.
N_E	:	finesse enregistrée.
N_R	:	finesse réflectrice.

N_q	:	nombre de franges Michelson balayées pendant le q^{e} cycle.
p	:	ordre d'interférence du F.P.
p'	:	ordre d'interférence du Michelson
p_R	:	ordre d'interférence du réseau
P et P'	:	pression du gaz dans l'enceinte du F.P.
R	:	pouvoir de réflexion des lames du F.P.
R_o	:	pouvoir de résolution théorique .
S_{ni}	:	Signal Michelson sinusoïdal.
S'_{ni}	:	signal rectangulaire dérivée de S_{ni}.
Sréf	:	signal rectangulaire déclenché par S'_{ni}.
S'réf	:	signal carré de période 2. Tq
s	:	largeur de B (σ)
T	:	pouvoir de transmission des lames du F.P. durée d'un balayage.
T_{ni}	:	période du signal Michelson.
Tq	:	période exacte de référence.
T'q	:	période approchée de référence.
t	:	temps.
u	:	pas du réseau.
W (σ)	:	fonction d'appareil du F.P.
W_R (σ)	:	fonction d'appareil du réseau.
w	:	largeur de W (σ)
X	:	nombre d'ordresF.P. balayés au cours d'un cycle.

$Y(\sigma)$	:	fonction enregistrée.
y	:	largeur de $Y(\sigma)$
Δ	:	intervalle de temps entre deux fronts de même indice de S'_{Hi} et S'réf.
$\Delta\sigma$	:	intervalle entre ordres du F.P.
δ	:	différence de marche.
ε	:	intervalle entre les nombres d'ondes idéal et réel
σ et σ'	:	nombre d'ondes transmis par le spectromètre.
σ_R	:	nombre d'ondes transmis par le réseau.
σ_{Hi}	:	nombre d'ondes de la source Michelson.
τ	:	durée de l'unité de temps.

L'obtention de spectres à haute résolution dans le domaine du visible permet l'interprétation de nombreuses structures atomiques et moléculaires. Les résolutions exigées sont obtenues en utilisant les techniques de spectrométrie interférentielle : spectrométrie Fabry-Pérot depuis fort longtemps, spectrométrie par transformée de Fourier depuis ces dernières années (1), (2).

L'inconvénient majeur du spectromètre photo-électrique Fabry-Pérot est la nécessité de lui adjoindre un prémonochromateur, afin d'isoler une seule bande spectrale ; l'exploration d'un intervalle spectral important implique alors un déplacement synchronisé des bandes passantes du prémonochromateur et de l'élément résolvant.

Divers procédés ont été étudiés pour déplacer la bande passante de l'étalon Fabry-Pérot :

1 - Variation mécanique de l'épaisseur des lames (3), (4), (5), (6).
2 - Emploi de cales piézo-électriques (7), (8).
3 - Emploi de cales susceptibles de magnétostriction (9), (10), (11).
4 - Variation de l'indice du gaz entre les lames (12), (13), (14), (15).

Nous avons choisi cette dernière méthode, le prémonochromateur étant un spectromètre à réseau.

La présente étude porte sur la mise au point d'un servomécanisme digital, assurant le synchronisme du déplacement des deux bandes passantes.

PREMIERE PARTIE

ETUDE THEORIQUE

Dans les chapitres qui suivent nous établissons quelques résultats fondamentaux pour la réalisation de notre asservissement.

CHAPITRE I

CONCEPTION GENERALE DU SPECTROMETRE

Le principe du spectrophotomètre Fabry-Pérot est bien connu ; la figure I.1 précise ses principaux éléments.

Dans ce chapitre nous rappelons brièvement les résultats fondamentaux nécessaires à notre travail.

I - L'élément résolvant :

Il est constitué par un étalon interférentiel de Fabry-Pérot placé dans une enceinte dont il est possible de faire varier la pression, donc l'indice du gaz entre les deux lames de l'étalon.

I.1 - Etalon parfait Fonction A (σ)

Pour un étalon parfait, la loi de transmission d'un rayon d'incidence i et de nombre d'ondes σ est :

$$A(\sigma) = \frac{I}{I_0} = \left(\frac{T}{1-R}\right)^2 \cdot \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 (2\pi ne\, \sigma \cos i)}$$

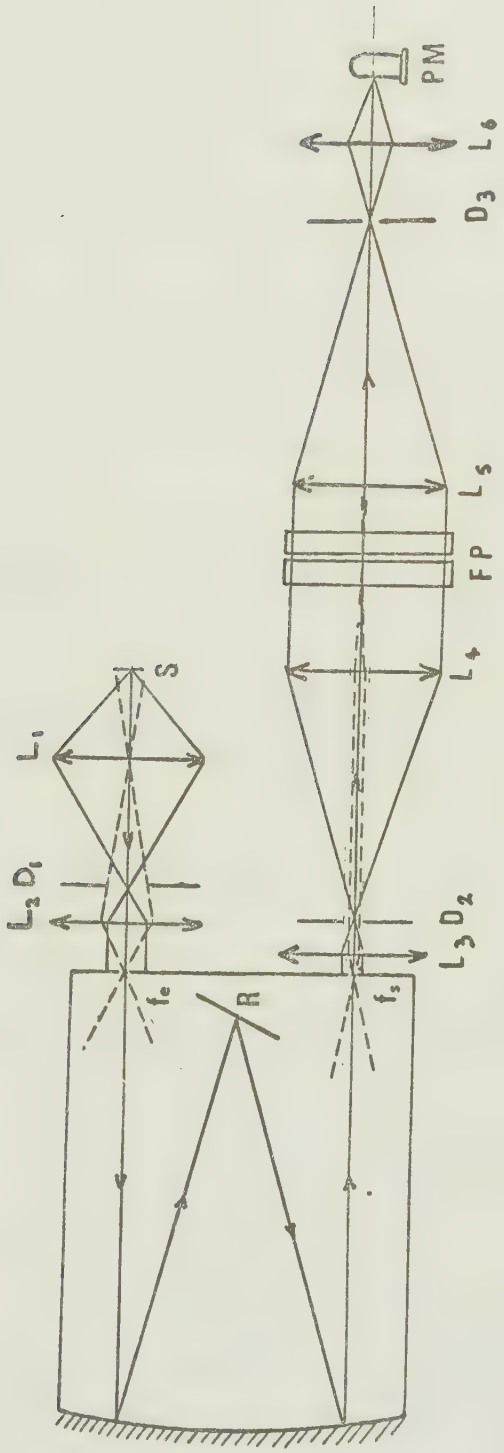


Fig I-1

où : R : pouvoir réflecteur des lames

T : pouvoir de transmission

e : épaisseur de l'étalon

n : indice du gaz séparant les lames.

Le facteur $\left(\frac{T}{1-R}\right)^2$ est la transparence globale du Fabry-Pérot

$\frac{1}{1+\frac{4R}{(1-R^2)}\sin^2(2\pi n e \sigma \cos i)}$ est une fonction d'Airy

La largeur de la fonction A (σ) vaut :

$$a\,(cm^{-1}) = \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}} \cdot \frac{1}{2\,ne\,(cm)\cos i}$$

Elle est le produit de deux facteurs :

- l'un : $\Delta\sigma = \frac{1}{2\,ne\,\cos i}$ ne dépend que de la différence de marche entre deux rayons émergents successifs du Fabry-Pérot.

- l'autre : $\frac{1-R}{\pi\sqrt{R}}$ ne dépend que du pouvoir réflecteur du système.

Il est classique de faire intervenir la notion de finesse réflectrice (6) définie par :

$$N_R = \frac{\Delta\sigma}{a} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

Corrélativement nous pouvons écrire :

$$a = \frac{\Delta \sigma}{N_R}$$

La recherche d'un grand pouvoir de résolution nous conduit à choisir a aussi petit que possible ; ceci est obtenu pratiquement :

- d'une part, en utilisant un étalon de Fabry-Pérot ayant un pouvoir réflecteur voisin de 1 pour augmenter N_R .
- d'autre part, en l'éclairant sous une incidence normale pour diminuer $\Delta \sigma$.

Dans ces conditions, la fonction $A(\sigma)$ se présente sous la forme d'un peigne de Dirac dont chaque dent a une largeur non nulle.

L'intervalle entre ordres est alors égal à :

$$\Delta \sigma \ (cm^{-1}) = \frac{1}{2\ ne\ (cm)}$$

1.2 - Etalon réel Fonction $W(\sigma)$

La fonction d'appareil $W(\sigma)$ pour un étalon réel peut s'écrire sous la forme d'un produit de convolution de trois fonctions (6) :

$$W(\sigma) = A(\sigma) * D(\sigma) * F(\sigma)$$

où :

$D(\sigma)$ caractérise les défauts de surface du F.P.

$F(\sigma)$ caractérise le diaphragme isolateur.

La largeur w de cette fonction est égale au produit de composition des largeurs des trois fonctions intervenant dans $W(\sigma)$.

Soit d la largeur de $D(\sigma)$. Elle peut être mise sous la forme :

$$d = \frac{1}{N_D} \cdot \frac{1}{2\, ne \cos i}$$

où : $N_D = \frac{\Delta\sigma}{d}$ est un facteur ne dépendant que de la qualité de la lame, que l'on nomme finesse limite.

La largeur f de $F(\sigma)$ a pour expression :

$$f = \frac{\Omega\, \sigma}{2M}$$

où Ω est l'angle solide sous lequel on voit le diaphragme isolateur, du centre de la lentille placée en avant du F.P. (fig. I.2)

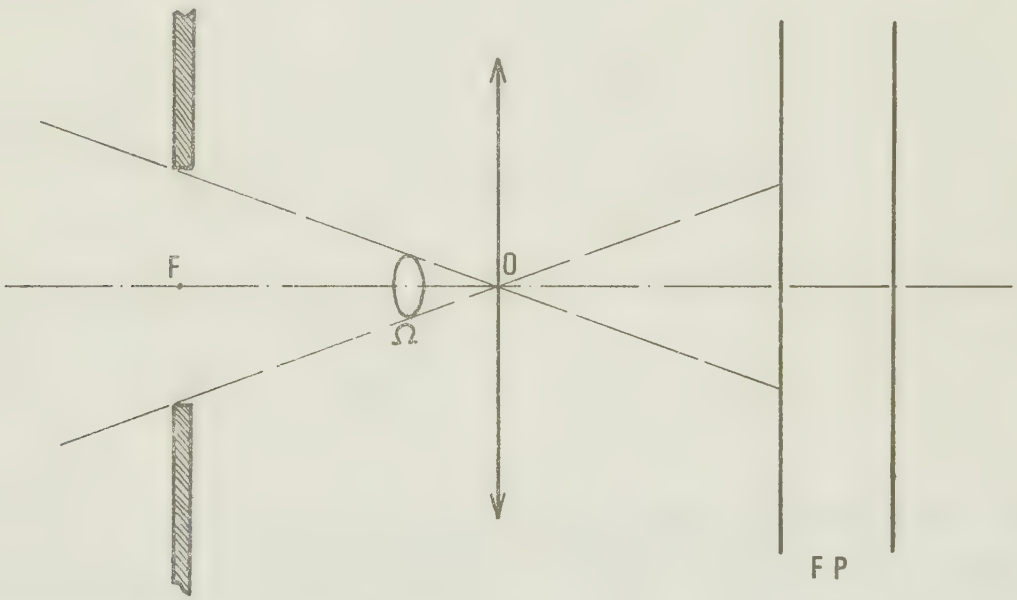


fig. I.2

Nous pouvons écrire symboliquement :

$$w = a \oplus d \oplus f$$

Pratiquement :

$$w \lesssim a + d + f$$

et $w > a$, $w > d$, $w > f$

La finesse d'appareil est celle qui correspond à cette largeur w ; elle est au plus égale à la plus petite des finesses N_R, N_D, $\frac{\Delta \sigma}{f}$.

1.3 - Fonction enregistrée

La fonction enregistrée par un photomultiplicateur placé après le Fabry-Pérot est le produit de convolution de la fonction d'appareil $W(\sigma)$ par la fonction $B(\sigma)$ définissant le profil spectral :

$$y(\sigma) = W(\sigma) * B(\sigma)$$

A sa largeur :

$$y = w \oplus s \quad (s : \text{largeur de } B(\sigma))$$

Il correspond à la finesse enregistrée :

$$N_E = \frac{\Delta \sigma}{y}$$

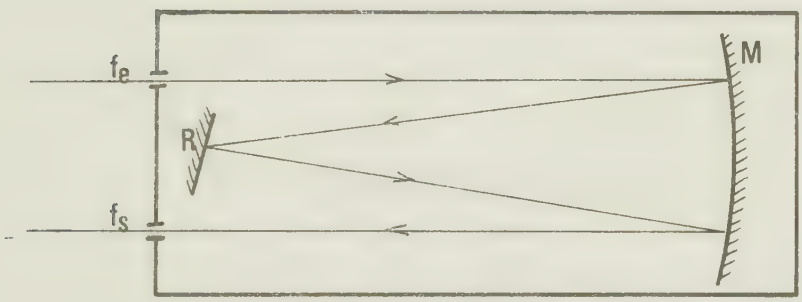
Les finesses enregistrées sont généralement voisines de 20 ; désirant une résolution de l'ordre de 400.000 pour un nombre d'ondes proche de 20000 cm^{-1}, nous sommes conduits à fixer l'intervalle entre ordres du Fabry-Pérot à $1 cm^{-1}$.

Le Fabry-Pérot transmet donc un ensemble de bandes spectrales de largeur w ; deux bandes successives sont distantes de $\Delta\sigma = 1 cm^{-1}$.

L'enregistrement d'un spectre nécessite l'élimination de toutes ces bandes sauf une ; ceci est réalisé en plaçant devant l'élément résolvant un prémonochromateur à fentes.

II - Le Prémonochromateur

Le prémonochromateur utilise un réseau par réflexion dans un montage du type Ebert Fastie (16) (fig. 1.3)



M : Miroir concave

R : Réseau

fe : fente d'entrée

fs : fente de sortie

fig. 1.3

II.1 - caractéristiques du réseau

Le réseau est blazé dans le premier ordre pour la longueur d'onde 5460 Å. Il comporte 2200 traits au mm sur une hauteur de 72 mm et une largeur de 75 mm.

Son pouvoir de résolution théorique est donc :

R_o = 165.000 dans le premier ordre.

L'ensemble à une focale de 1150 mm avec une ouverture de fente de 80 μ.

L'intervalle entre ordres du Fabry-Pérot est $\Delta\sigma = 1 cm^{-1}$. L'exploitation d'un spectre s'étendant de 18000 à 22000 cm^{-1}, nécessite donc un pouvoir de résolution du prémonochromateur de l'ordre de 20000 ; cette valeur étant égale au $\frac{1}{10}$ de R_o, nous bénéficierons d'une plus grande luminosité.

II.2 - Fonction d'appareil

On sait qu'un monochromateur à réseau, utilisé avec un pouvoir de résolution déterminé, transmet un maximum d'intensité lumineuse si les fentes d'entrée et de sortie ont des largeurs égales. Dans ces conditions la fonction d'appareil $W_R(\sigma)$ est un triangle dont la bande passante est égale à la largeur à mi-hauteur du triangle (fig. 1.4).

La fonction d'appareil correspondant au couplage du réseau avec l'interféromètre de Fabry-Pérot correspond au schéma de la figure 1.5.

Si lors nous envisageons un désynchronisme entre le déplacement des bandes passantes des deux éléments du monochromateur (Réseau + Fabry-Pérot), la

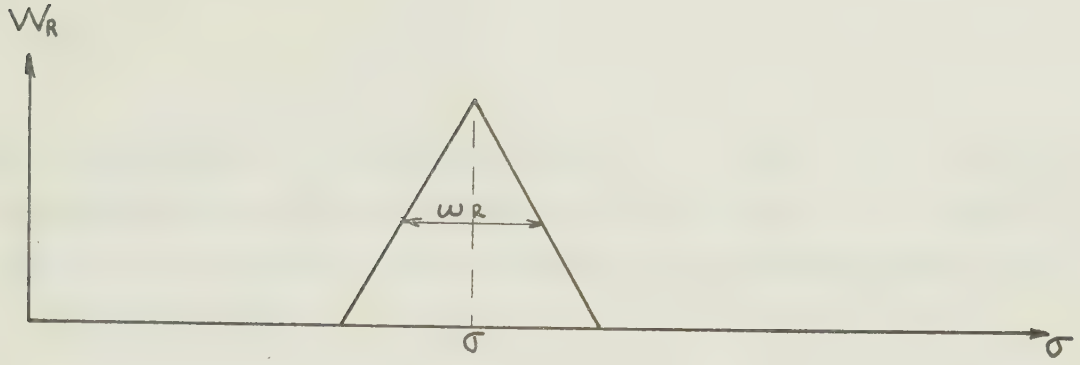


fig. I-4

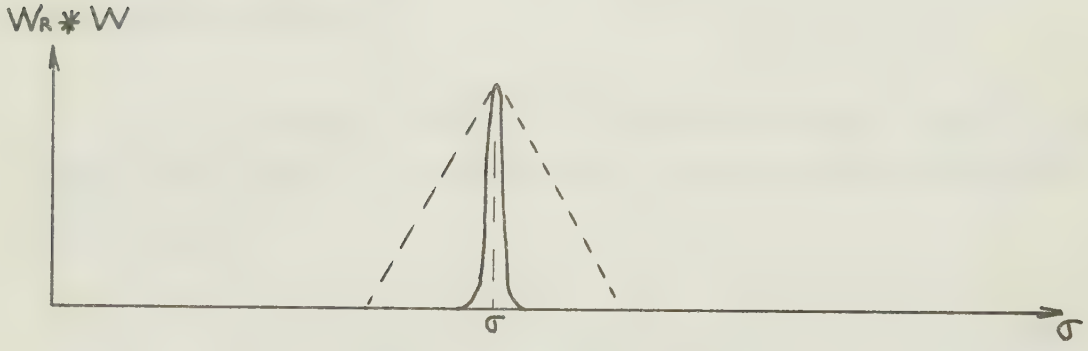


fig . I-5

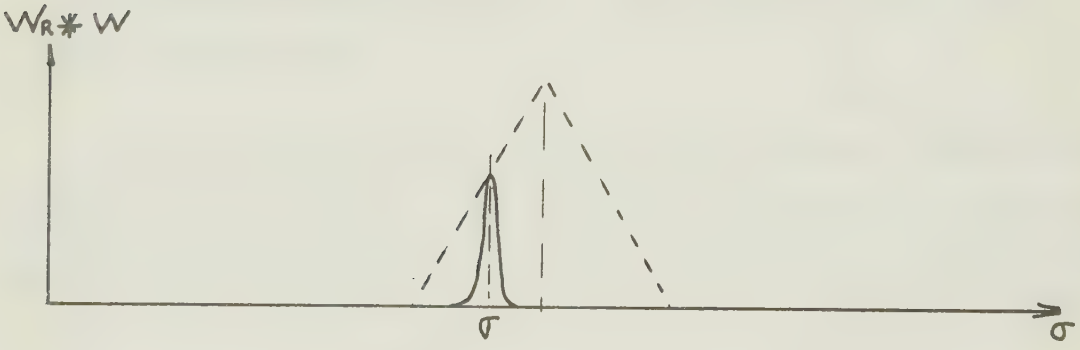


fig . I-6

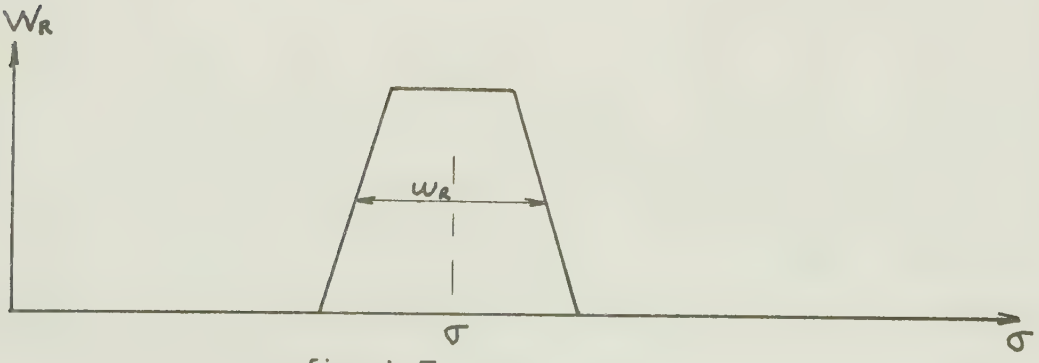


fig. I-7

fonction d'appareil de l'ensemble est modifiée et il en résulte une atténuation des intensités lumineuses (fig.I.6). Pour pallier cet inconvénient nous prendrons des largeurs de fentes inégales. La fonction d'appareil du prémonochromateur est alors un trapèze (fig.I.7).

III - Exploration du spectre

L'ensemble constitué par le prémonochromateur à réseau et l'étalon de Fabry-Pérot constitue un monochromateur de très grande résolvance alliée à une bonne luminosité.

Nous obtiendrons un spectromètre intégral en adjoignant à cet ensemble un système explorateur chargé d'assurer le déplacement du monochromateur c'est-à-dire un déplacement synchronisé des bandes passantes du réseau et de l'étalon de Fabry-Pérot.

Le déplacement de la bande passante du réseau est obtenu par simple rotation de celui-ci. Quant au Fabry-Pérot, nous en modifions l'épaisseur optique en agissant sur l'indice du gaz entre les deux lames par l'intermédiaire de la pression.

CHAPITRE II

ETUDE DU SYSTEME EXPLORATEUR

I - Balayage du réseau :

Le réseau joue le rôle de prémonochromateur. Sa bande passante doit donc être déplacée en synchronisme avec celle du Fabry-Pérot, afin de ne pas modifier la fonction d'appareil de l'ensemble monochromateur, lors de l'exploration du spectre.

Nous rappelons qu'avec un montage du type Ebert-Fastie (fig.II.1), le nombre d'ondes de la radiation transmise peut s'écrire :

$$\sigma_R = \frac{p_R}{2u \cdot \sin\alpha \cdot \sin\beta}$$

où :

p_R	:	ordre d'interférence
u	:	pas de réseau
α	:	angle de la normale au réseau avec l'axe du spectromè
β	:	angle d'un rayon incident ou diffracté avec l'axe du spectromètre.

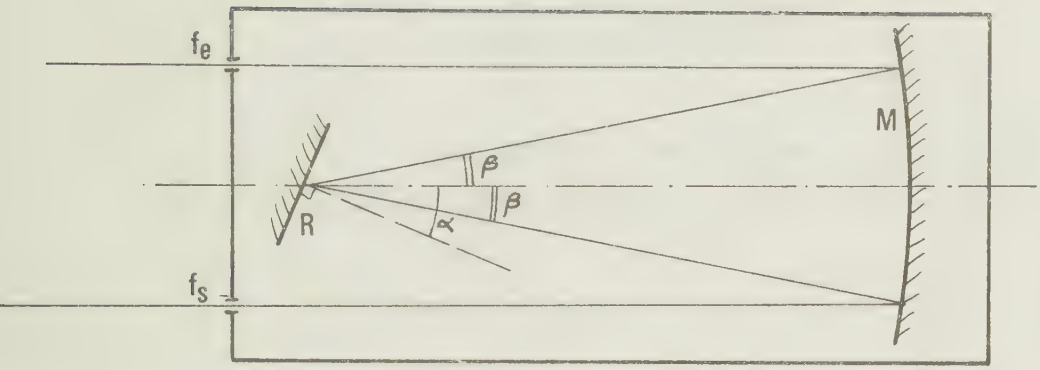


Fig. II.1

Nous pouvons donc déplacer σ_R en modifiant α par rotation du réseau.

II - Balayage du Fabry-Pérot :

II.1 - Déplacement de la bande passante du Fabry-Pérot

La fonction d'appareil de l'interféromètre de Fabry-Pérot se présente approximativement sous la forme d'un peigne de Dirac. Les nombres d'ondes des différentes radiations transmises sous incidence normale vérifient la loi suivante :

$$2 \; n \; e \; \sigma = p \qquad (1)$$

dans laquelle p , ordre d'interférence, est un entier.

Cette relation montre que pour un étalon d'épaisseur donnée, le nombre d'ondes de la radiation transmise avec l'ordre p , ne dépend que de l'indice du gaz entre les lames. Il en résulte que toute modification de cet indice provoquera un déplacement de la bande passante du Fabry-Pérot.

II.2 - Balayage en pression

Les résultats expérimentaux montrent que l'indice d'un gaz est fonction de sa masse volumique et varie dans le même sens que celle-ci (17).

L'indice d'un gaz est donc fonction de :

- sa pression
- sa température.

Toute action sur l'un de ces facteurs, en modifiant l'indice, déplace la bande passante du Fabry-Pérot.

Nous avons choisi d'agir sur la pression, tout en conservant la température constante. En effet, une augmentation de la température entraînerait des dilatations perturbatrices pour la manipulation.

II.3 - Limitation du balayage

L'exploration d'un intervalle spectral de 4000 cm^{-1} dans le visible correspond à des variations relatives de σ de l'ordre de 20 %. En supposant que la loi de Sellmeier (17) reste valable, cela correspondrait à une variation de pression de plusieurs centaines d'atmosphères. Il est bien évident qu'une telle transformation ne peut être réalisée du fait des déformations de la cellule d'analyse qui en découleraient. Nous tournerons cette difficulté en contrôlant des cycles de pression de quelques bars seulement.

III - Balayage de l'ensemble monochromateur :
Etude d'un cycle élémentaire.

Il résulte de l'étude précédente que l'enregistrement d'un spectre

étendu doit être fractionné en plusieurs tronçons. Chaque tronçon est exploré au cours d'un cycle élémentaire de variations de pression.

Un tel cycle peut être représenté par le diagramme de la figure II.2

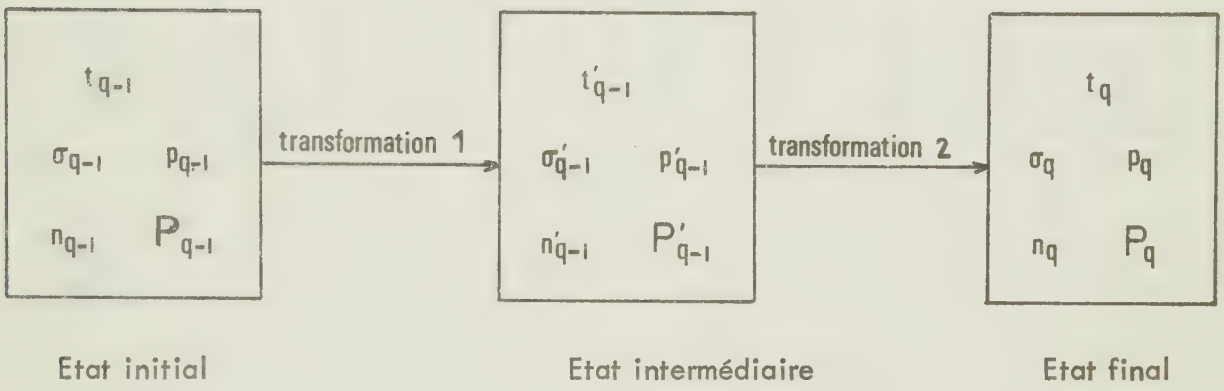


Fig. II.2

où :

t et t' : temps

σ : nombre d'onde de la radiation transmise par le monochromateur

p : ordre interférentiel du F.P. correspondant à σ

n_i et n_i' : indice du gaz

P_i et P'_i : pression du gaz

III.1 - Etude de la transformation I

A l'état initial, nous supposons réalisée la coïncidence entre la fenêtre du réseau et la fenêtre d'ordre p_{q-1} du Fabry-Pérot (fig. II.3).

La radiation transmise par le monochromateur est :

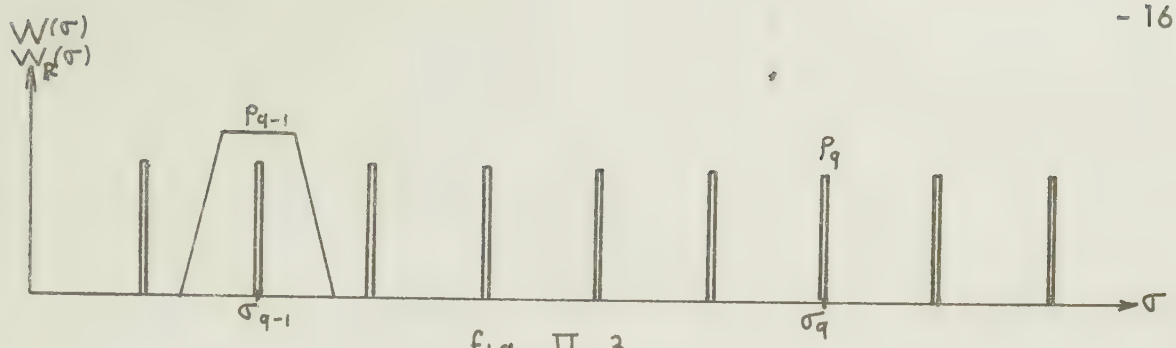


fig. II-3

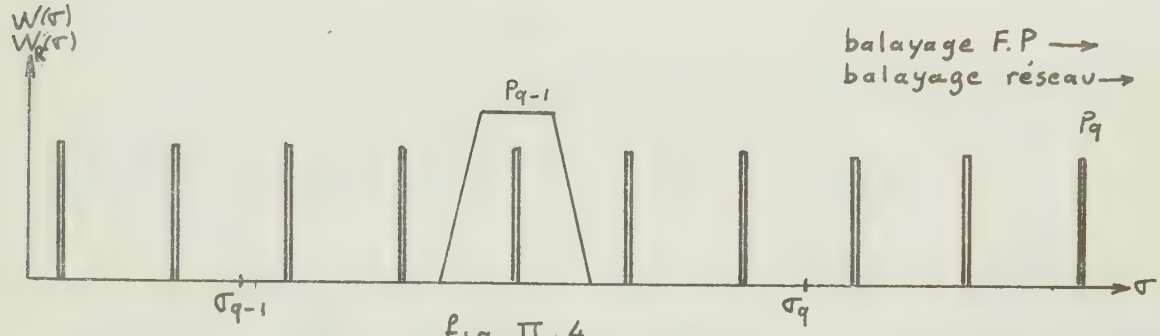


fig. II-4

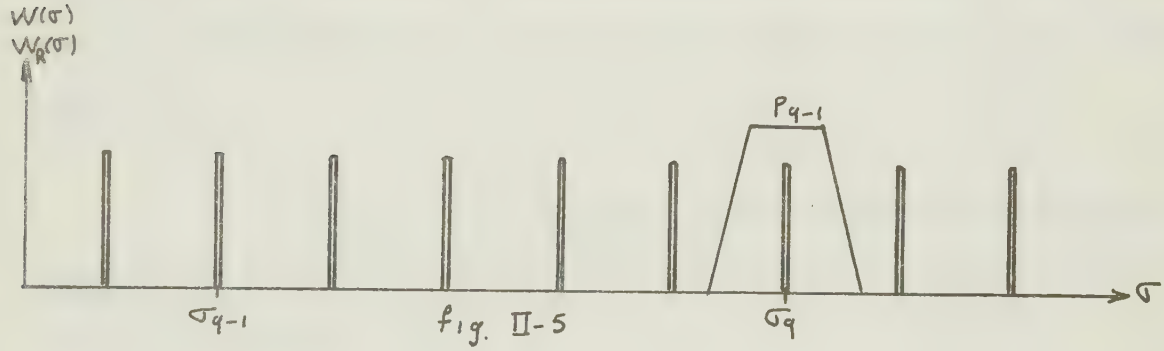


fig. II-5

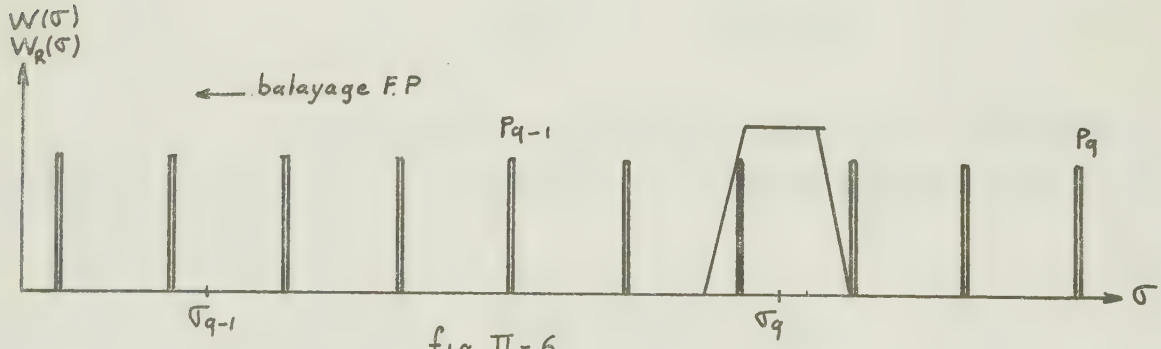


fig. II-6

$$\sigma_{q-1} = \frac{p_{q-1}}{2\, n_{q-1} \cdot e}$$

La pression du gaz dans la cellule contenant le Fabry-Pérot est P_{q-1} (supérieure à la pression atmosphérique) et son indice est n_{q-1}.

A l'instant t_{q-1}, nous commandons simultanément la rotation du réseau, le vidage de la cellule et l'enregistrement du spectre. De la diminution de pression dans la cellule, il résulte une variation d'indice dans le même sens, d'où une augmentation du nombre d'ondes de la radiation transmise par le Fabry-Pérot avec l'ordre p_{q-1} (fig. II.4)

Au cours de la transformation, l'ordre d'interférence de la bande passante du Fabry-Pérot en coïncidence avec c elle du réseau, reste constant ; ce qui peut s'exprimer par la relation :

$$n\,\sigma = C^{te} \quad (2)$$

Lorsque la pression a diminué de quelques bars, simultanément, la cellule est isolée, le réseau est bloqué et l'enregistrement est stoppé (fig. II.5). Nous avons alors la relation :

$$2\, n'_{q-1} \cdot \sigma_q \cdot e = p_{q-1} \quad (1')$$

III.2 - Etude de la transformation 2

Cette 2ème transformation a pour objet de mettre en coïncidence la fenêtre du réseau avec la fenêtre d'ordre p_q du Fabry-Pérot, l'ensemble transmettant

la radiation σ_q de l'état intermédiaire.

Pour cela, à l'instant t'_{q-1}, nous augmentons la pression dans la cellule, tandis que le réseau reste bloqué (fig. II.6).

Le système est à nouveau isolé lorsque la pression atteint une valeur P_q, telle que l'indice du gaz n_q vérifie : (fig. II.7)

$$2\ n_q \cdot \sigma_q \cdot e = p_q \quad (1")$$

Le cycle complet peut être représenté par la figure II.8.

IV - Calcul des variations d'indice : Simplification du cycle.

Nous calculerons tout d'abord les variations d'indice au cours d'un cycle, puis nous en déduirons les conséquences pour le balayage complet.

IV.1 - Transformation 1. Calcul de $\Delta_q n$

Ecrivons que la relation (2) est vérifiée pour l'état initial et pour l'état intermédiaire :

$$n_{q-1} \cdot \sigma_{q-1} = n'_{q-1} \cdot \sigma_q$$

Posons :

$$n'_{q-1} = n_{q-1} - \Delta_q n \quad (3)$$

$$\sigma_q = \sigma_{q-1} + \Delta_q \sigma \quad (4)$$

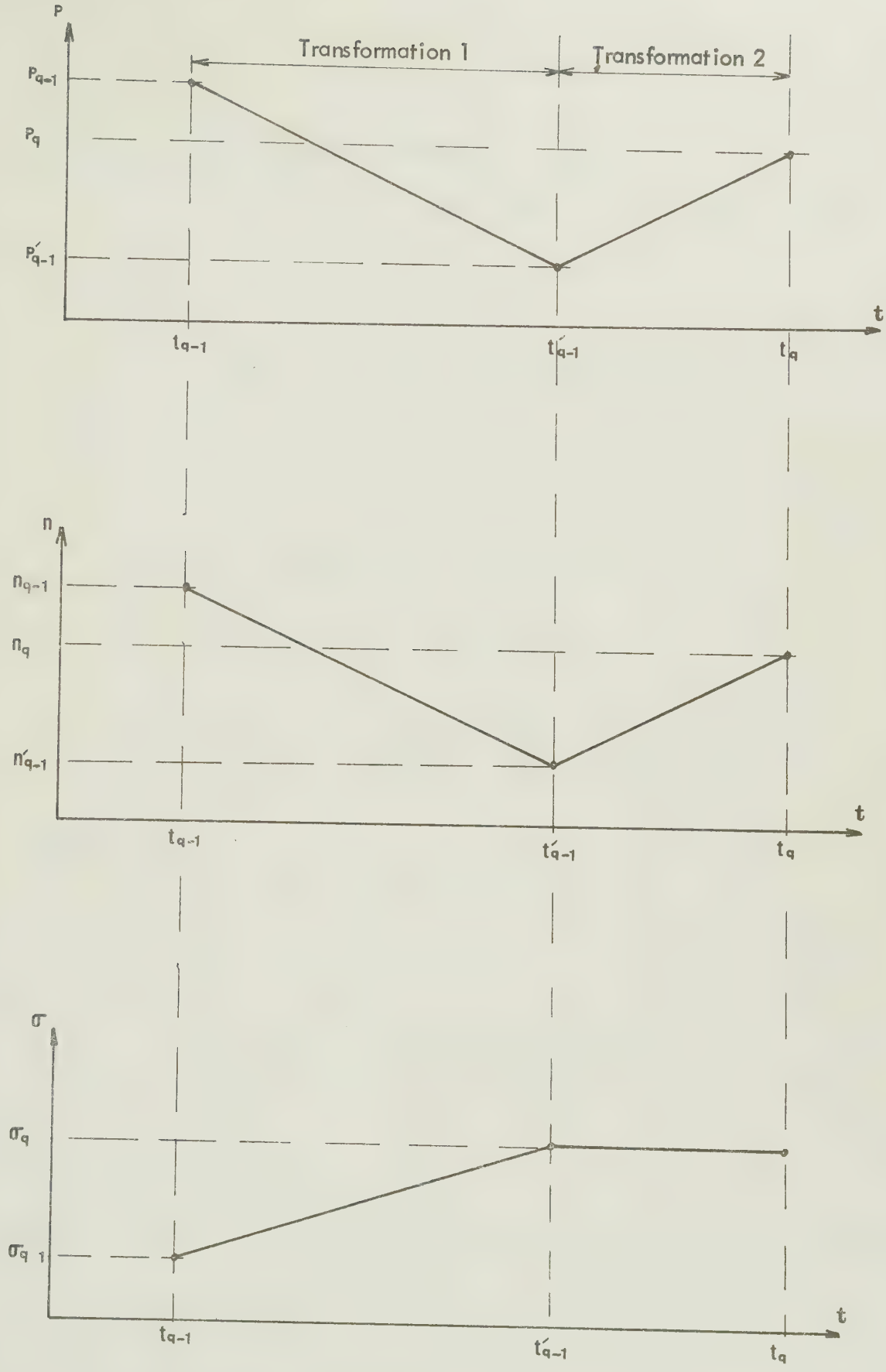

P
Transformation 1
Transformation 2
P_{q-1}
P_q
P'_{q-1}
t
t_{q-1}
t'_{q-1}
t_q
n
n_{q-1}
n_q
n'_{q-1}
t
t_{q-1}
t'_{q-1}
t_q
σ
σ_q
$\sigma_{q\,1}$
t
t_{q-1}
t'_{q-1}
t_q

Figure II.8

En substituant dans la relation précédente, il vient :

$$n_{q-1} \cdot (\sigma_q - \Delta_q \sigma) = (n_{q-1} - \Delta_q n)\, \sigma_q$$

d'où nous tirons :

$$\Delta_q n = \frac{n_{q-1} \cdot \Delta_q \sigma}{\sigma_q} \qquad (5)$$

IV.2 - Transformation 2 - Calcul de $\Delta'_q n$.

Des relations (1') et (1") nous tirons :

$$\frac{1}{2e\,\sigma_q} = \frac{n'_{q-1}}{\bar{p}_{q-1}} = \frac{n_q}{\bar{p}_q} = \frac{n_q - n'_{q-1}}{\bar{p}_q - \bar{p}_{q-1}}$$

Posons :

$$n_q = n'_{q-1} + \Delta'_q n \qquad (6)$$

et $$p_q = p_{q-1} + X \qquad (7)$$

En substituant dans la relation précédente, il vient :

$$\frac{\Delta'_q n}{X} = \frac{1}{2e\,\sigma_q}$$

D'où nous tirons :

$$\Delta'_q n = \frac{X}{2e \cdot \sigma_q} \qquad (8)$$

IV.3 - Condition supplémentaire

L'état initial étant connu, l'ensemble des relations (3) à (8) forme un système de 6 équations à 8 inconnues. Si nous choisissons la valeur de X, nous pouvons imposer une relation supplémentaire.

Afin de simplifier le cycle, nous choisissons :

$$n_q = n_{q-1} \qquad (9)$$

IV.4 - Conséquences

Le choix de la relation (9) se justifie par les conséquences suivantes :

1) par récurence nous obtenons :

$$n_q = n_o \quad (9') \quad \forall\, q$$

où n_o : indice initial du cycle 1

Dans les conditions de travail, l'indice du gaz n'est fonction que de la pression.

La relation (9') se traduit alors par :

$$P_q = P_o \quad \forall\, q$$

où P_o : pression initiale du cycle 1

Pratiquement : TOUS LES CYCLES DEBUTERONT A LAMEME PRESSION P_o

2) la résolution du système nous donne :

$$\Delta_q n = \Delta'_q n = \frac{X}{2e\,\sigma_q} \qquad (10)$$

Cette relation montre que $\Delta_q n$ dépend de σ_q ; donc :

LES VARIATIONS DE PRESSION DEPENDENT DE L'INDICE q DU CYCLE.

3) Nous obtenons également :

$$\Delta_q \sigma = \frac{X}{2e \cdot n_{q-1}}$$

en tenant compte de (g')

$$\Delta_q \sigma = \frac{X}{2 n_o \cdot e} \qquad (11)$$

L'INTERVALLE SPECTRAL $\Delta_q \sigma$ EST INDEPENDANT DE L'INDICE DU CYCLE

En conclusion, l'exploration d'un spectre peut être représentée par la figure II.9.

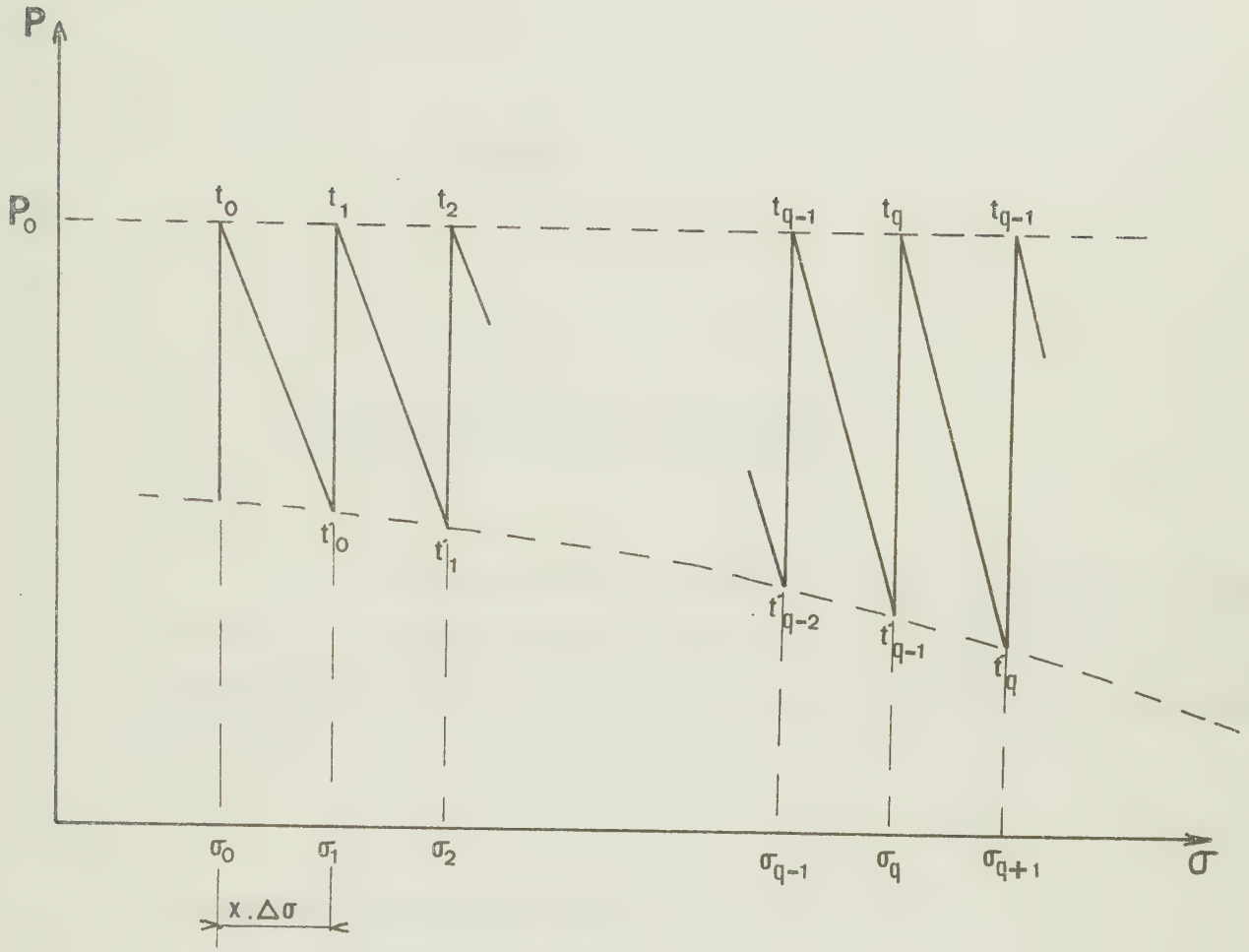

P
P_o
t_o
t_1
t_2
t_{q-1}
t_q
t_{q-1}
t'_o
t'_1
t'_{q-2}
t'_{q-1}
t'_q
σ_o
σ_1
σ_2
σ_{q-1}
σ_q
σ_{q+1}
σ
$x.\Delta\sigma$

figure II - 9

CHAPITRE III

ETUDE DU CONTROLE DE PRESSION

L'étude précédente met en évidence la nécessité d'obtenir un contrôle très précis des variations de pression ou d'indice. Nous avons adopté pour cela un procédé maintenant classique, utilisant les franges d'interférences d'un interféromètre de Michelson.

I - Analyse du système de contrôle

I.1 - Description du montage :

Le système de contrôle est réalisé à partir d'un interféromètre de Michelson du type Saunders (18) (fig. III-1).

Un des bras du Michelson, le bras de mesure, est en communication avec la cellule d'analyse. L'indice de réfraction dans ce bras est donc celui du gaz baignant l'étalon de Fabry-Pérot.

L'autre bras, le bras de référence, est isolé par deux fenêtres munies de joints toriques ; de plus, afin d'éliminer les variations d'indice dans ce bras en cours de manipulation, nous y réalisons un vide primaire.

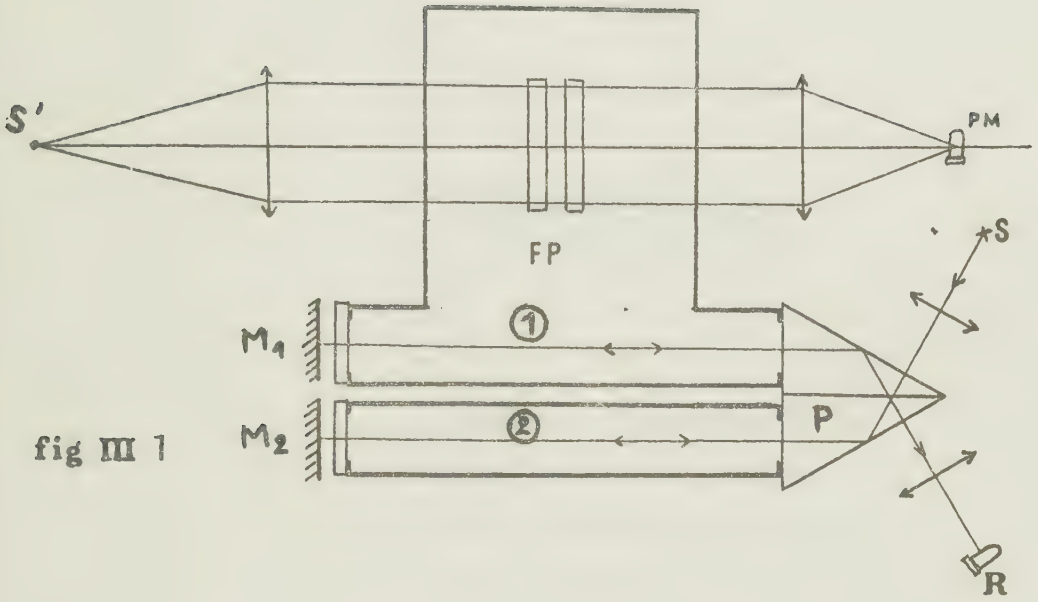


fig III 1

Fig. III.1

P	:	Prisme de Köster
M_1	:	Miroir
M_2	:	Miroir
S	:	Source monochromatique
R	:	Récepteur
①	:	Bras de mesure
②	:	Bras de référence.

I.2 - Relation fondamentale :

Soient :

L : longueur du bras de mesure

L' : longueur du bras de référence

e' : épaisseur totale des deux fenêtres

n : indice du bras de mesure

n_o : indice du bras de référence

n_v : indice du verre des fenêtres.

La différence de marche entre deux rayons interférents est :

$$\delta = 2 \ (n\ L - n_o\ L' - n_v\ e')$$

Si σ_{Mi} est le nombre d'ondesde la radiation éclairant le Michelson, l'état d'interférence du système s'écrit :

$$2\ (n\ L - n_o\ L' - n_v\ e') \cdot \sigma_{Mi} = p' \qquad (12)$$

p' : ordre d'interférence du Michelson.

L'intensité lumineuse recueillie par le récepteur est de la forme :

$$I = \alpha + \beta \ \cos \left[4\pi \cdot \sigma_{Mi} \cdot (n\ L - n_o\ L' - n_v\ e') \right]$$

I est donc une fonction sinusoïdale de l'indice ou de la pression du gaz dans la cellule (fig. III-2). Leurs variations entraînent un défilement de franges brillantes.

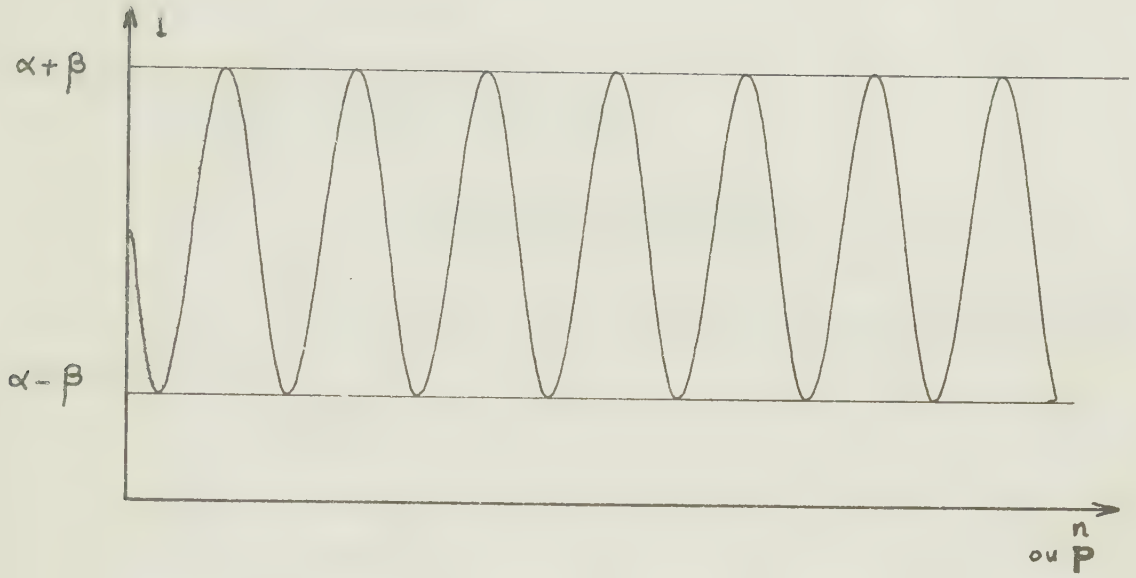


Fig. III-2

II - Contrôle des variations d'indice au cours d'un cycle :
Calcul du nombre de franges

Le défilement d'une frange brillante enregistrée sur le récepteur, correspond au passage de p' à p' + 1.

En différentiant la relation (12) nous obtenons :

$2 . L . \sigma_{Mi} . dn = dp'$

Pour des variations finies au cours d'un cycle q, nous pouvons écrire :

$2 L . \sigma_{Mi} . (- \Delta_q n) = \Delta_q p'$ (13)

Posons $- \Delta_q p' = N_q$ nombre de franges.

En reportant dans (13) l'expression de $\Delta_q n$ donnée par (10), nous obtenons après simplification :

$$N_q = X . \frac{L}{e} . \frac{\sigma_{Mi}}{\sigma_q} \qquad (14)$$

III - Contrôle de la vitesse de balayage

III.1 - Conditions de fonctionnement

Au cours d'un balayage, nous devons assurer les deux relations suivantes :

$$2 n e \sigma = p_{q-1} = C^{te} \qquad (15)$$

$$\sigma = \sigma_R \qquad (16)$$

La relation (15) traduit le fait que l'ordre d'interférence du Fabry-Pérot reste constant au cours d'un balayage. La relation (16) exprime la coïncidence entre la fenêtre du réseau et une fenêtre du Fabry-Pérot.

Si nous supposons la relation (16) vérifiée au début d'un balayage par un règlage préalable, nous pouvons la remplacer par sa forme dérivée :

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\sigma_R}{dt} \qquad (17)$$

Afin de simplifier le problème, nous choisissons un balayage de σ linéaire par rapport au temps.

Notre réseau étant muni d'un dispositif d'entraînement permettant un tel balayage (voir annexe I) , nous devons assurer $\frac{d\sigma}{dt} = C^{te}$ par un asservissement contrôlant les variations de pression dans la cellule.

III.2 - Fréquence de défilement des franges

La relation (15) étant vérifiée, en dérivant par rapport au temps nous pouvons écrire :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{p_{q-1}}{2e} \cdot \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{\sigma}\right) \qquad (18)$$

En dérivant de même la relation (12), nous obtenons :

$$\frac{dp'}{dt} = 2L\,\sigma_{Ni}\,\frac{dn}{dt} \qquad (19)$$

Nous avions posé :

$- \Delta p' = N$

ce qui entraîne :

$dp' = -dN$

d'où nous tirons :

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_q = -\frac{L}{e}\,\sigma_{Ni}\,p_{q-1}\,\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{\sigma}\right) \qquad (20)$$

Cette relation montre que nous pouvons contrôler $\frac{d\sigma}{dt}$ par l'intermédiaire de la fréquence de défilement des franges.

III.3 - Simplification de la loi de défilement

La loi précédente est de la forme :

$$\frac{dN}{dt} = \frac{K_p}{\sigma^2} \cdot \frac{d\sigma}{dt}$$

Kp étant une constante dépendant du cycle.

Les variations de σ au cours d'un cycle sont faibles, quelques cm^{-1}, devant σ lui-même ; nous sommes alors tentés de remplacer l'expression théorique de $\frac{dN}{dt}$ par une constante. Si T est la durée du balayage au cours d'un cycle, cette constante doit être telle que N_q franges de Michelson défilent pendant le temps T ; ce qui donne :

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)'_q = \frac{N_q}{T}$$

En remplaçant N_q par son expression (14), il vient :

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)'_q = X \cdot \frac{L}{e} \cdot \frac{\sigma_{ni}}{\sigma_q} \cdot \frac{1}{T} \qquad (21)$$

Les courbes représentant les variations de N et σ en fonction du temps sont tracées sur la figure III.3.

III.4 - Définition de la définience

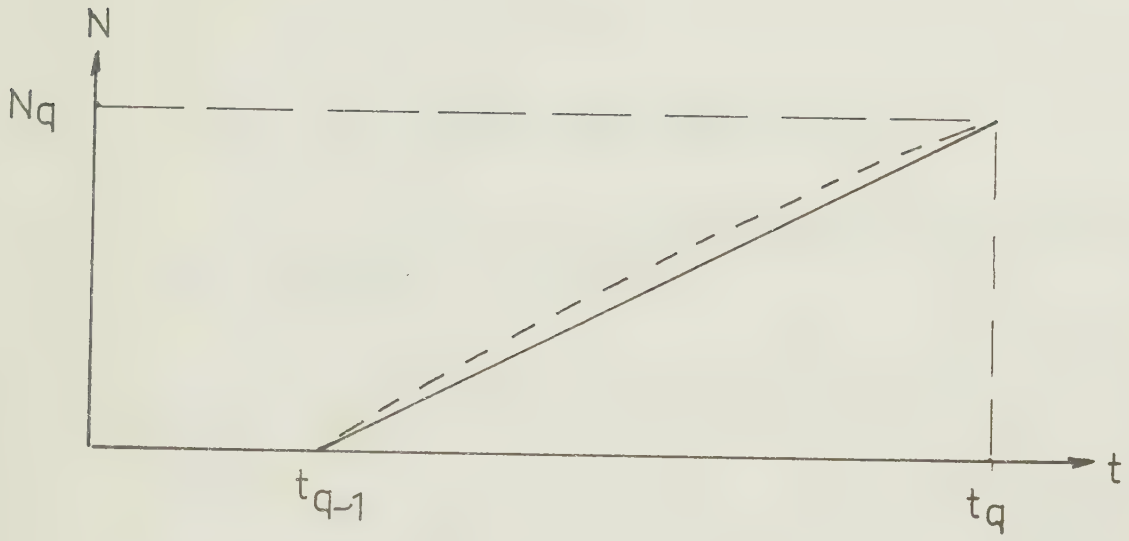
Rappelons que l'on définit la définience du système par la relation :

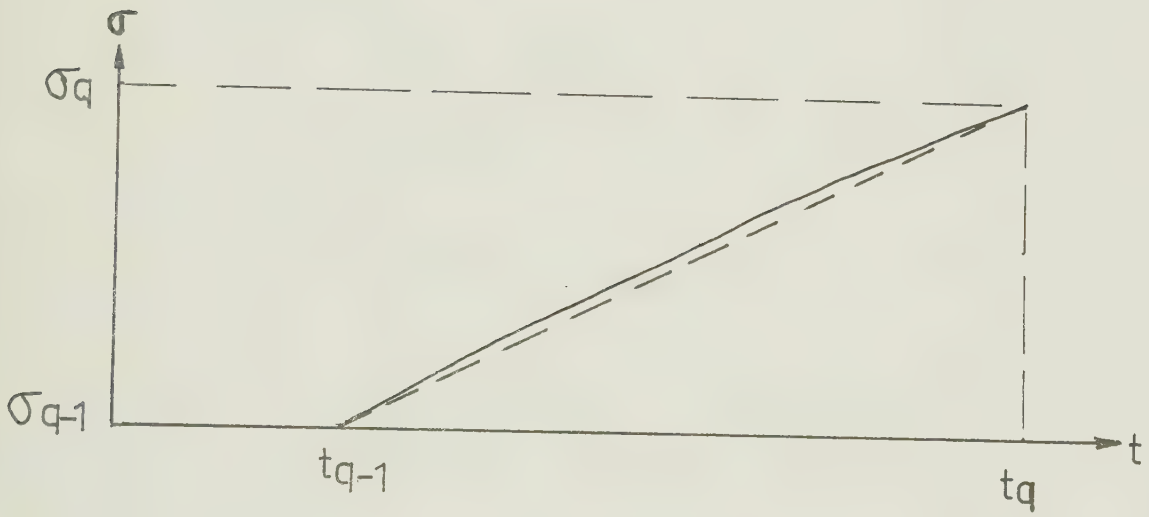
$$D = \frac{\sigma}{\mathcal{E}}$$

$\mathcal{E}$ étant l'écart maximum entre la valeur mesurée et la valeur vraie de σ

Pour notre problème, il est intéressant de définir la définience relative à un balayage :

$$D_R = \frac{\sigma_q - \sigma_{q-1}}{\mathcal{E}}$$





——— courbe réelle

– – – courbe théorique

figure III-3

III.5 - Calcul de la définience du système

Désignons par σ' le nombre d'ondes de la radiation transmise à un instant t en appliquant la relation (21).

Les différentes phases d'un cycle q sont indiquées dans le tableau suivant :

	début de balayage	en cours de balayage	fin de balayage
Instant	t_{q-1}	t	$t_q = t_{q-1} + T$
nombre d'ondes théorique	σ_{q-1}	σ	$\sigma_q = \sigma_{q-1} + \Delta_q\sigma$
nombre d'ondes réel	$\sigma'_{q-1} = \sigma_{q-1}$	σ'	$\sigma'_q = \sigma_q$

Evaluons l'erreur que nous commettons sur le nombre d'ondes en appliquant la relation (21)

La loi théorique nous donnerait :

$$\frac{\sigma - \sigma_{q-1}}{\Delta_q\sigma} = \frac{t - t_{q-1}}{T}$$

La loi simplifiée nous donne :

$$\frac{\sigma' - \sigma_{q-1}}{\sigma'} = \frac{\Delta_q\sigma}{\sigma_q} \quad \frac{t - t_{q-1}}{T}$$

Posons :

$$\varepsilon = \sigma - \sigma'$$

Des relations précédentes, nous tirons :

$$\varepsilon = \frac{(\sigma_q - \sigma).(\sigma - \sigma_{q-1})}{\sigma_q + \sigma_{q-1} - \sigma}$$

Nous trouvons un majorant de ε en prenant $\sigma = \sigma_q$ au dénominateur et $\sigma = \frac{\sigma_{q-1} + \sigma_q}{2}$ au numérateur. En tenant compte de la valeur de $\sigma_{q-1} - \sigma$ (10) il vient :

$$\varepsilon \leq \frac{1}{\sigma_{q-1}} \cdot \left(\frac{X}{4 n_o e}\right)^2$$

Pour un cycle quelconque, $\sigma_{q-1} - \sigma$ est petit devant σ nous pouvons donc écrire

$$\sigma_{q-1} \approx \sigma$$

D'où l'expression de la définience :

$$D = \left(\frac{4 n_o e \sigma}{X}\right)^2$$

et celle de la définience relative à un cycle :

$$D_R = \frac{8 n_o e \sigma}{X}$$

Remarquons que leurs valeurs seront d'autant plus grandes que X sera petit ; d'où la nécessité de limiter l'étendue du balayage au cours d'un cycle.

DEUXIEME PARTIE

REALISATION EXPERIMENTALE

Après une description succinte de l'ensemble de l'installation, nous expliquons comment nous avons mis en oeuvre les résultats de la première partie afin d'assurer le synchronisme entre le prémonochromateur et l'élément résolvant.

CHAPITRE I

FONCTIONNEMENT GENERAL

I - Description de l'installation

L'ensemble d'analyse spectrale est représenté par la figure I.1. Il se compose :

- du prémonochromateur
- de la cellule d'analyse contenant l'élément résolvant
- des dispositifs annexes.

I.1 - Le prémonochromateur :

Il est constitué par un réseau inséré dans un montage Ebert-Fastie.

Nous rappelons ci-dessous ses caractéristiques principales :

- nombre de traits au mm : 2000
- largeur : 75mm
- hauteur : 72mm
- "blazé" dans le premier ordre pour la longueur d'onde 5460 Å.

Le réseau est monté sur un support lui permettant un mouvement de rotation commandé par un moteur à pas à pas. Cet entraînement assure un balayage de σ linéaire par rapport au temps avec une grande précision. Un moteur secondaire facilite un positionnement rapide sur un nombre d'ondes déterminé.

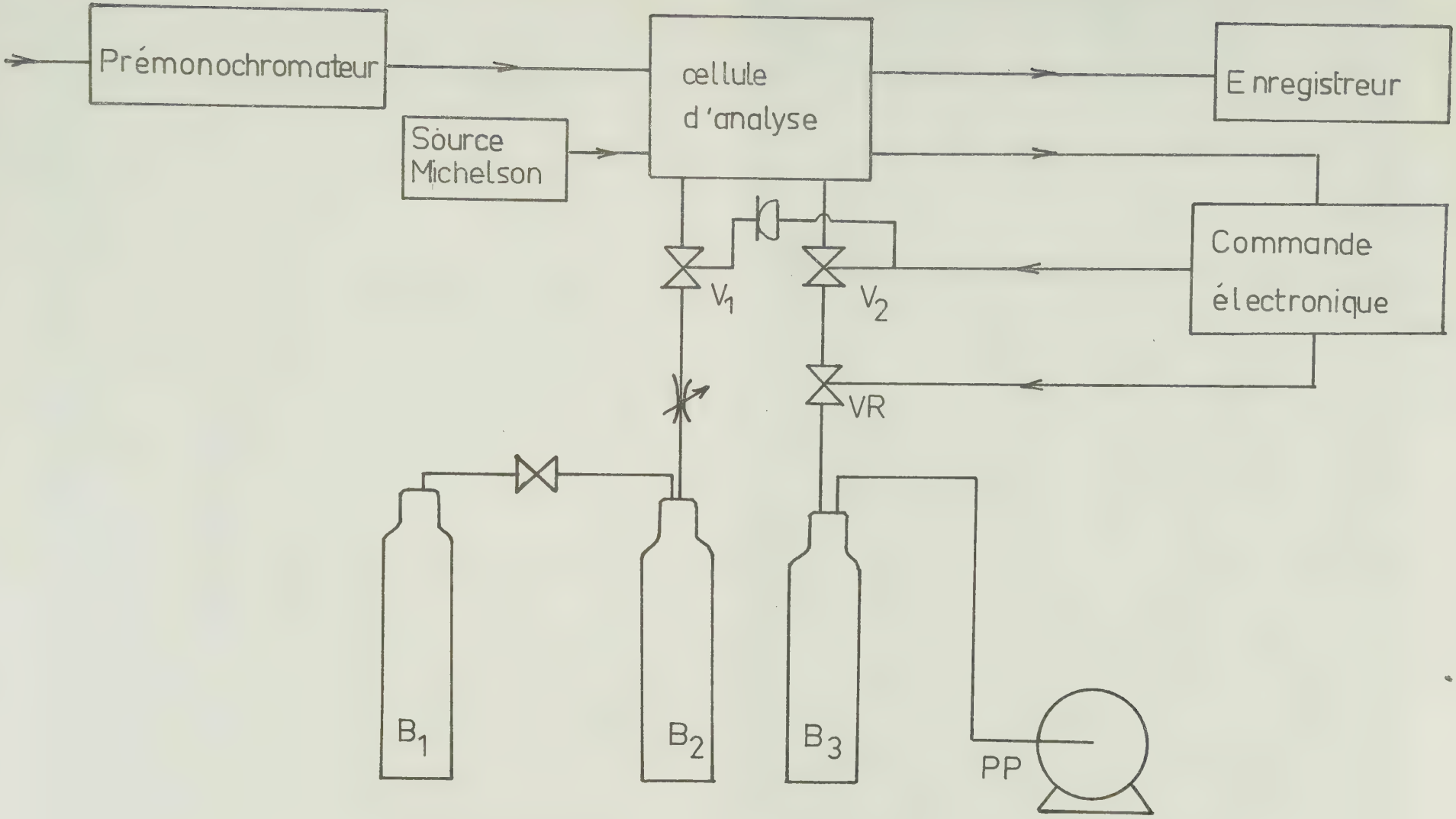
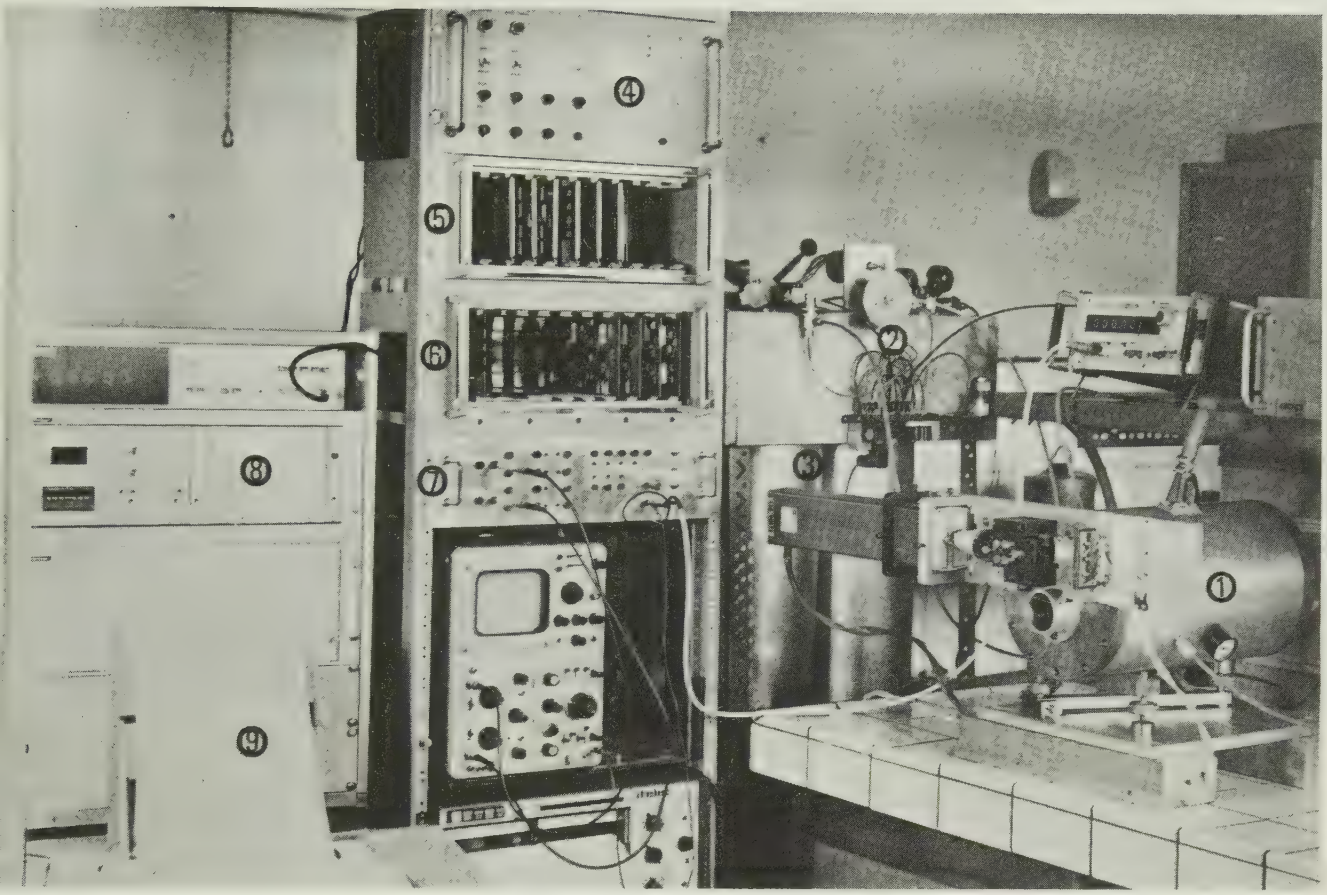
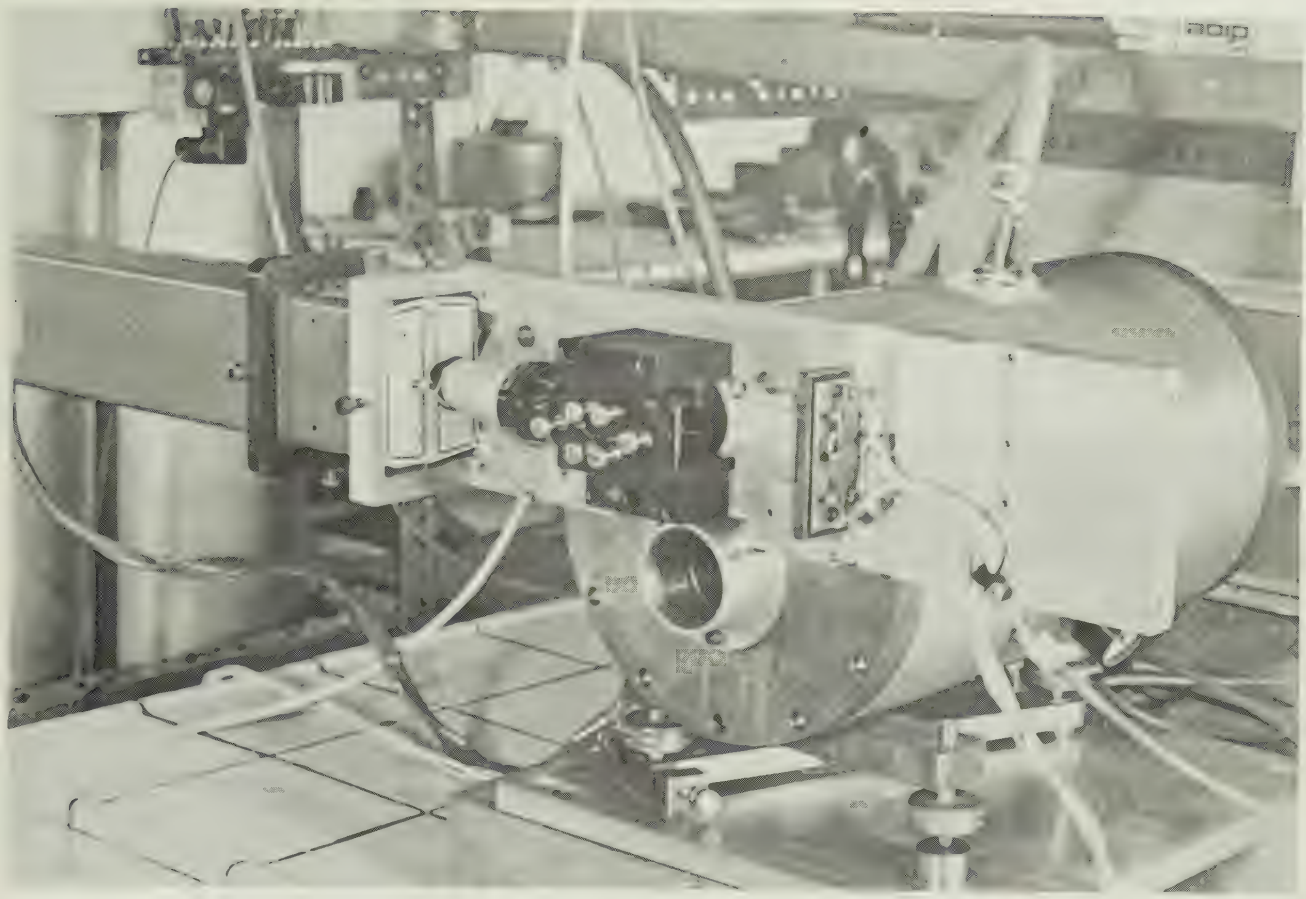

Prémonochromateur
cellule d'analyse
Enregistreur
Source Michelson
Commande électronique
V1
V2
VR
B1
B2
B3
PP

figure I-1

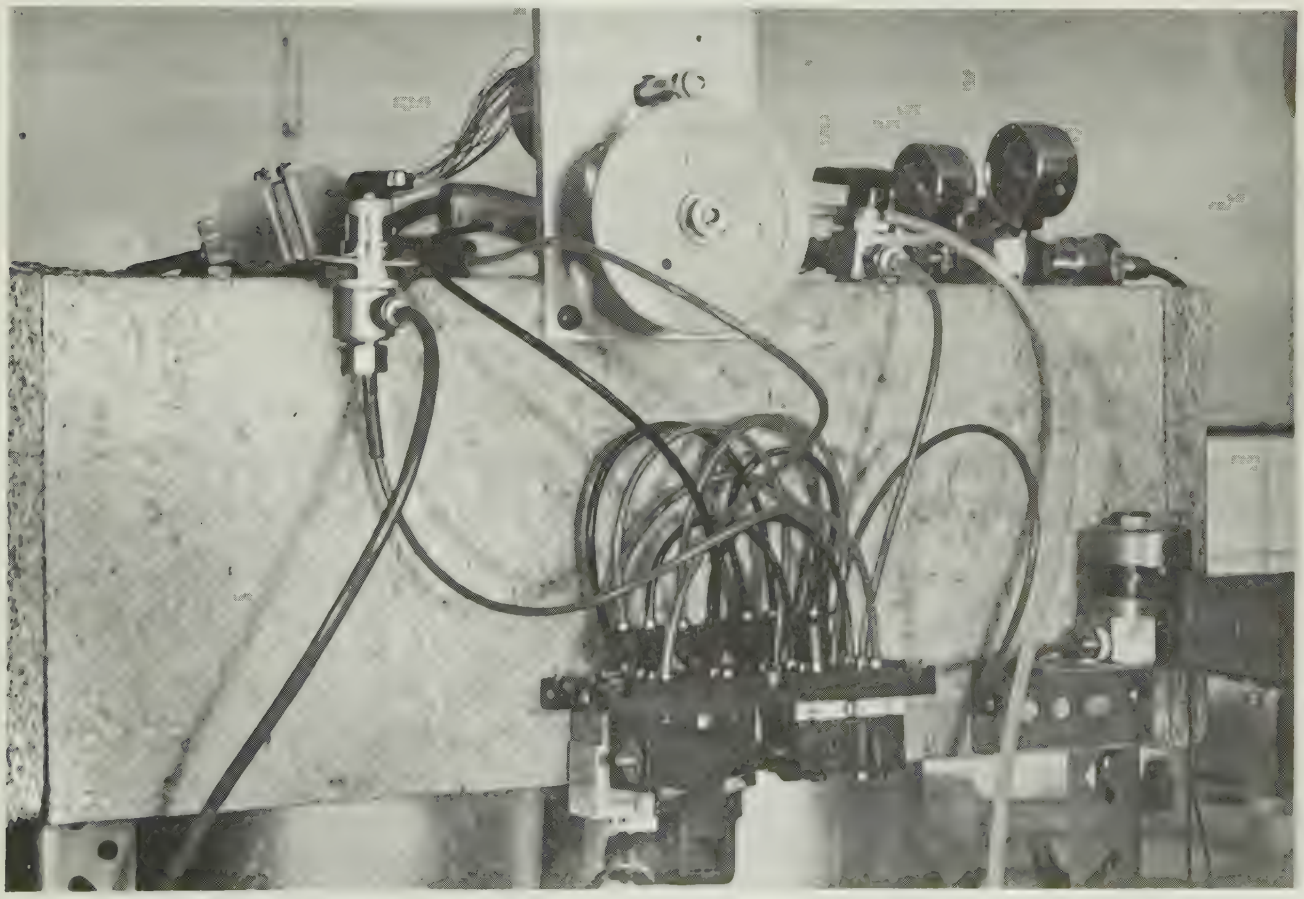


VUE D'ENSEMBLE DE L'INSTALLATION

①	:	Cellule d'analyse
②	:	Vannes de contrôle
③	:	Bouteilles d'azote
④	:	Alimentations
⑤	:	Rack logique
⑥	:	Rack analogique
⑦	:	Rack de commande et visualisation
⑧	:	Centrale de mesures
⑨	:	Imprimante et perforatrice de bandes.



DETAIL DE LA CELLULE D'ANALYSE



DETAIL DES VANNES DE CONTROLE

I.2 - La cellule d'analyse :

Elle contient l'étalon de Fabry-Pérot et l'interféromètre de Michelson (fig. I.2). De forme cylindrique, elle est réalisée en alliage d'aluminium. Chaque extrémité est obturée par un couvercle en acier muni d'un joint torique. L'emploi de ce matériau nous a été imposé pour diminuer les déformations dues aux efforts de pression : un banc d'optique est en effet solidaire de l'un des couvercles ; ce banc supporte la source, les miroirs de renvoi et les récepteurs (voir plus loin) de l'interféromètre de Michelson.

I.3 - Les dispositifs annexes

Les cycles de pression dans la cellule d'analyse sont contrôlés par les vannes V_1 et V_2. Notons que ces vannes sont à commande pneumatique ; l'emploi d'électro-vannes est à prohiber ; les temps de fonctionnement de V_1 et V_2 étant de plusieurs minutes, l'échauffement important du bobinage de l'électro-aimant pourrait être communiqué au corps de la vanne, et par suite, au gaz d'admission dans la cellule.

Le gaz utilisé est de l'azote sec ; nous éliminons ainsi les risques de condensation de vapeur d'eau dans la cellule. Cet azote est soutiré d'une bouteille B_1 sous une pression d'environ 200 bars. Il subit ensuite une détente en deux étages jusqu'à 6 bars, pression à laquelle il est stocké dans une bouteille tampon B_2. Le rôle de cette bouteille est de diminuer les effets thermiques dus à la détente.

Lors d'une augmentation de pression dans la cellule, l'admission du gaz se fait par l'intermédiaire d'un réducteur de débit constitué par une fuite Edwards. Cet élément est indispensable pour supprimer les phénomènes tourbillonnaires à l'intérieur de la cellule, lesquels perturberaient fortement le système interférentiel.

.../...

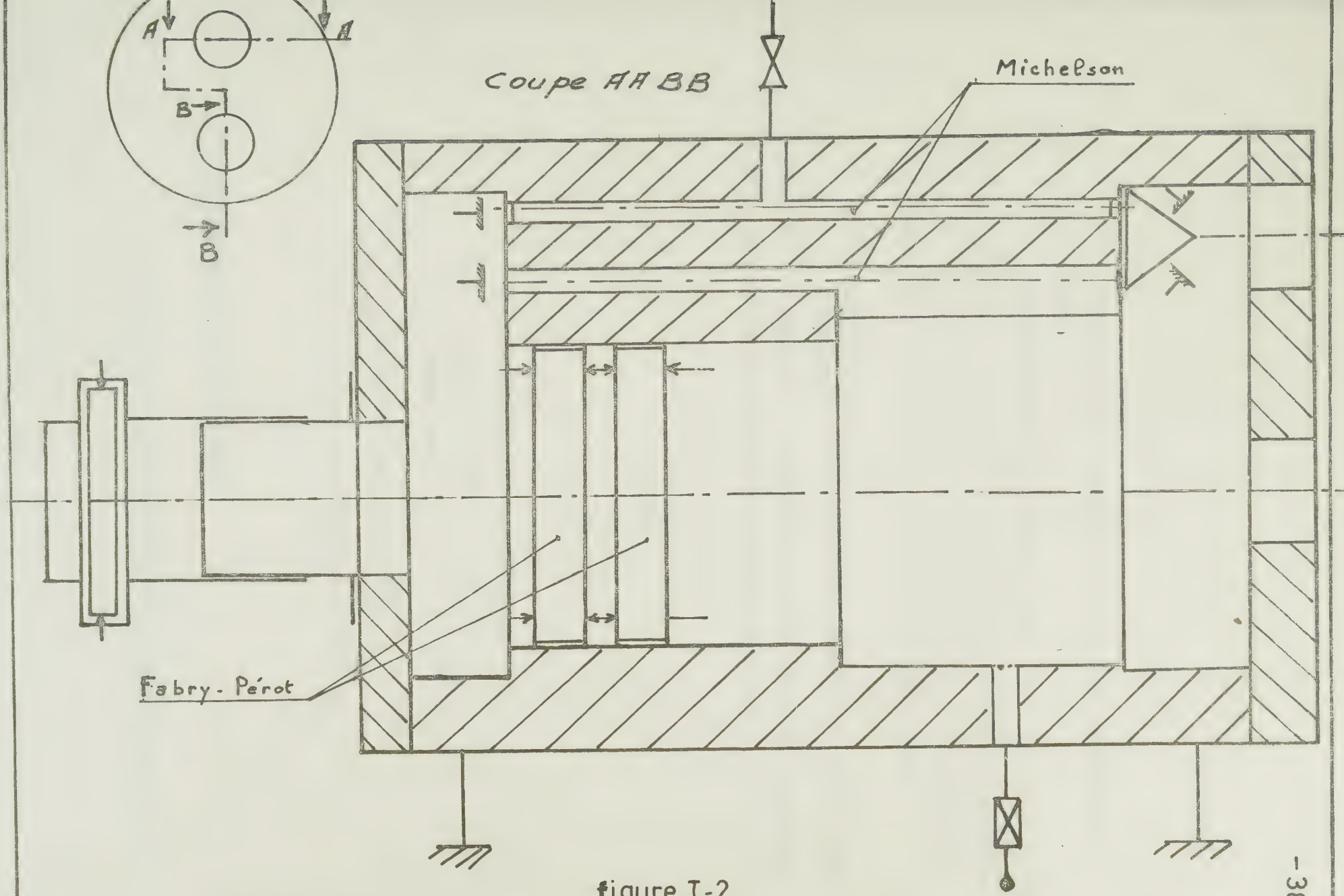


figure I-2

L'enregistrement du spectre s'effectue lors de la diminution de pression dans la cellule.

L'échappement du gaz est alors contrôlé par la vanne de régulation VR, associée à une commande électronique que nous détaillerons dans les chapitres suivants. En aval de VR nous trouvons une réserve de vide B_3, entretenue par une pompe à palette de 10 m3/h. Cette réserve de vide maintient le rapport :

$\frac{\text{pression amont}}{\text{pression aval}}$ des pressions aux orifices de la vanne, supérieur à 1,856. Dans ces conditions, VR possédant un ajutage convergent, nous obtenons un régime d'écoulement saturé obéissant à la relation suivante :

$$m' = k \cdot S_c \frac{P_{am}}{\sqrt{T_{am}}}$$

où :

m' : débit massique à travers l'orifice

S_c : section de l'orifice

P_{am} : pression amont de l'orifice

T_{am} : température amont de l'orifice

k : constante d'écoulement $\approx 4.10^{-2}$ SI

II - Fonctionnement au cours d'un cycle

Au cours d'un cycle nous distinguons plusieurs phases (fig. I.3)

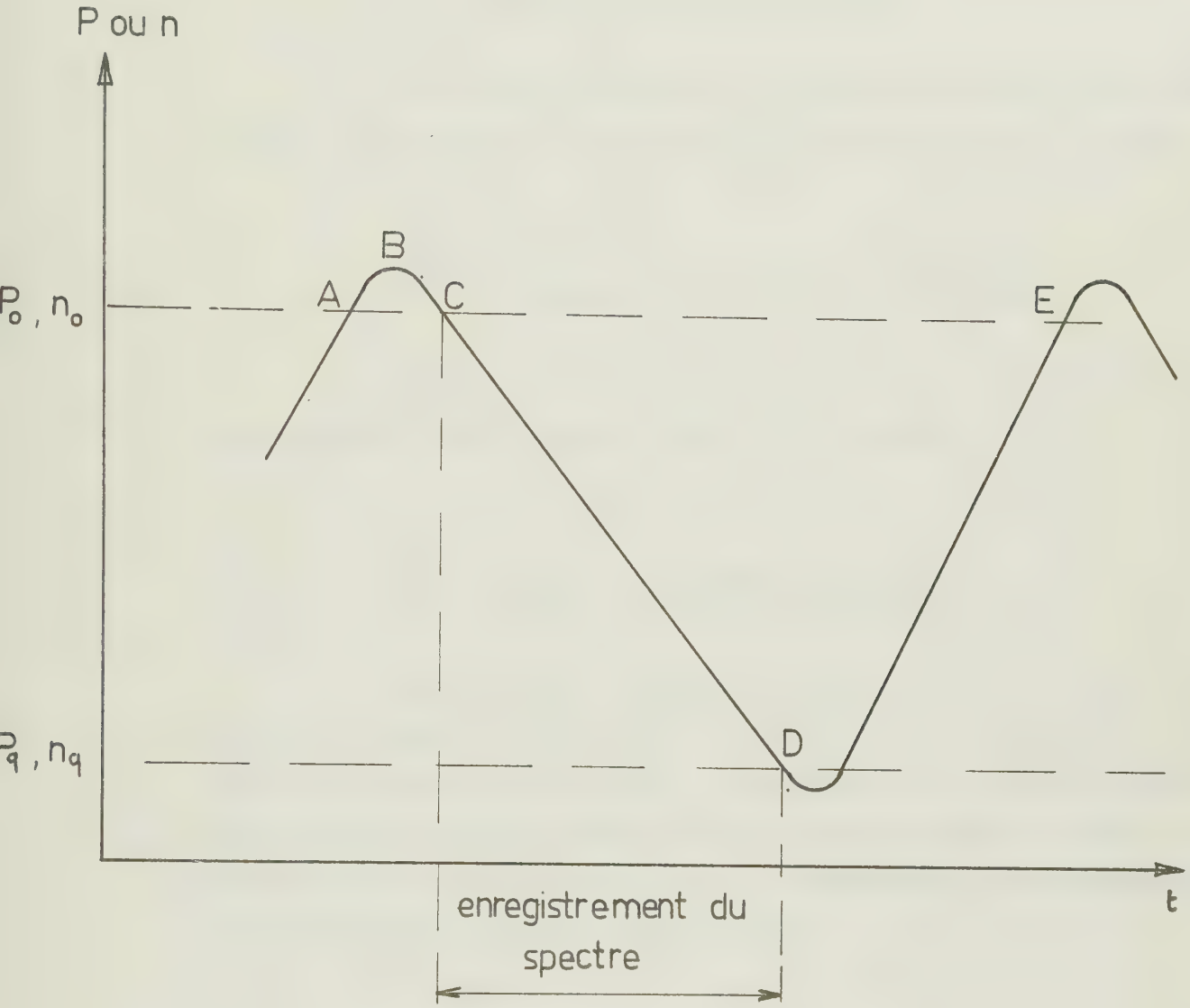


figure I-3

II.1 - de A à B : phase de dépassement

Le point A correspondant à la pression Po de début d'enregistrement du spectre, nous augmentons la pression dans la cellule pour arriver au point B.

II.2 - de B à C : régime transitoire de la régulation

En B nous fermons l'admission de gaz dans la cellule et nous ouvrons l'échappement;au même instant nous faisons agir la régulation de débit.

II.3 - de C à D : enregistrement du spectre

En C, le régime permanent étant établi, nous commandons la rotation du réseau et l'enregistrement du spectre. Simultanément nous commandons une correction de la régulation de forme " somme" . La régulation et sa correction imposent au nombre d'ondestransmis par le monochromateur une loi de variation par rapport au temps aussi proche que possible de la linéarité. L'abscisse de l'enregistrement spectral est dont exprimée directement en nombre d'ondes.

II.4 - de D à E : recalage de l'élément résolvant

En D l'échappement est stoppé ainsi que la rotation du réseau, l'enregistrement du spectre et la régulation. La vanne V_1 est ouverte commandant l'admission d'azote jusqu'à la pression Po où un nouveau cycle peut débuter.

CHAPITRE II

COMPTAGE DES FRANGES

Nous avons montré au chapitre III de la première partie, comment un interféromètre de Michelson peut être utilisé comme capteur de variations d'indice. Si le système était parfait, le signal Michelson issu du récepteur serait une sinusoïde. En fait, le signal obtenu est perturbé et doit être traité avant de pouvoir être utilisé.

I - Elaboration du signal Michelson

I.1 - Source lumineuse

La source lumineuse utilisée dans l'interféromètre de Michelson est un laser à gaz He - Ne Spectra-Physics.

Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- longueur d'onde : 6328 Å
- puissance : 0,5 mW
- divergence : 10^{-3} rd.
- stabilité à long terme : 5 %

Le choix d'une telle source a été orienté par les critères suivants :

- facilité de règlage de l'interféromètre.
- source afocale et monochromatique
- forte intensité lumineuse permettant l'emploi d'un récepteur à semi-conducteur.

I.2 - Récepteur

L'utilisation d'une source laser nous permet de substituer au photomultiplicateur classique, une photodiode ne nécessitant pas d'alimentation haute-tension.

Nous employons des microphotodiodes au silicium type 35F2 fabriquées par SESCO. Leurs caractéristiques principales sont présentées sur la figure II.1.

I.3 - Traitement du signal Michelson

Le récepteur est équivalent à une source de courant dont l'intensité est proportionnelle à l'éclairement. Cette source doit être adaptée en impédance. Par ailleurs, l'alimentation laser n'étant pas régulée, il subsiste une modulation résiduelle du signal à 100 Hz, qui nécessite un filtrage.

La chaîne de traitement est représentée par la figure II.2.

MICROPHOTODIODES PLANAR PASSIVÉES
NPN PLANAR PASSIVATED MICROPHOTODIODES

Ces photodiodes au Silicium sont des éléments Semiconducteurs à structure NPN planar passivée.
These Silicon photodiodes are NPN planar passivated devices.

Elles sont utilisées dans les systèmes de lecture de cartes perforées, le cinéma parlant, les systèmes de détection de lumière.
They are particularly used in punched cards and tapes readout, proportional control, counting, light detection systems etc...

LIMITES ABSOLUES D'UTILISATION A 25° C (ambiante) ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS AT 25° C (ambient)	SYMBOLES SYMBOLS	30 F 2 - 31 F 2 32 F 2 - 33 F 2 34 F 2	35 F 2	UNITÉS UNITS
tion du fonctionnement erating voltage		40	30	V
ipation ver dissipation		50	50	mW
ipation à 25° C (boîtier) sipation 25° C case		75	75	mW
pérature de fonctionnement erating temperature	t_j	- 55 + 125	- 65 + 125	°C
pérature de stockage rage temperature	t_{stg}	- 65 + 175	- 65 + 175	°C

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES A 25° C (ambiante) ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT 25° C (ambient)	SYMBOLES SYMBOLS	30 F 2	31 F 2	32 F 2	33 F 2	34 F 2	35 F 2	UNITÉS UNITS
ditions de mesure (tension continue mentation) supply voltage	V_R	24	24	24	24	24	24 (1)	V
ur max. du courant d'obscurité x. value of dark current	I_R	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	µA
ur nominale du courant d'obscurité minal value of dark current	I_R	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	µA
ur nominale du courant d'obscurité 0° C minal value of dark current at 100° C	I_R	1	1	1	1	1	1	µA
ibilité normale correspondant à un irement de nsitivity for an illumination of 2 500 lux 10 000 lux 500 lux.		0,03	0,02	0,04	0,08	0,16	0,3	µA/lm µA/lm µA/lm
pe à filament de tungstène 2870° K) ngsten lamp 2870° K)								
gueur d'onde de sensibilités max. ve length of maximum sensitivity	λ_M	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	µ
ps de réponse maximale ximum response time		7 (2)	7 (2)	7 (2)	7 (2)	7 (2)	7 (2)	µs
ur moy. du temps d'établissement ical value of response time		2,7 (2)	2,7 (2)	2,7 (2)	2,7 (2)	2,7 (2)	2,7 (2)	µs

(1) raison de la haute sens. de la 35 F2, l'utilisateur devra veiller à ne pas dépasser la puis. max. admis.
(1) because of the high sensitivity of 35 F 2, user must not exceed the max. allowable dissipation
(2) nditions de mesures R = 1 kΩ - V = 1 V.
(2) test conditions
s temps de délais sont inclus.
delay times are included
nérateur de lumière : diode As Ga excitée par 1 A
light source As Ga diode supplied by 1 A

s dispositifs sont soumis aux essais préconisés par la norme CCT 13-02
These devices are tested according to French standard specification CCT 13-02

ociété européenne des semiconducteurs
, rue de l'Amiral Mouchez - Paris 13e - Tél. 707.32.74 - 707.37.00 - Telex 20 520

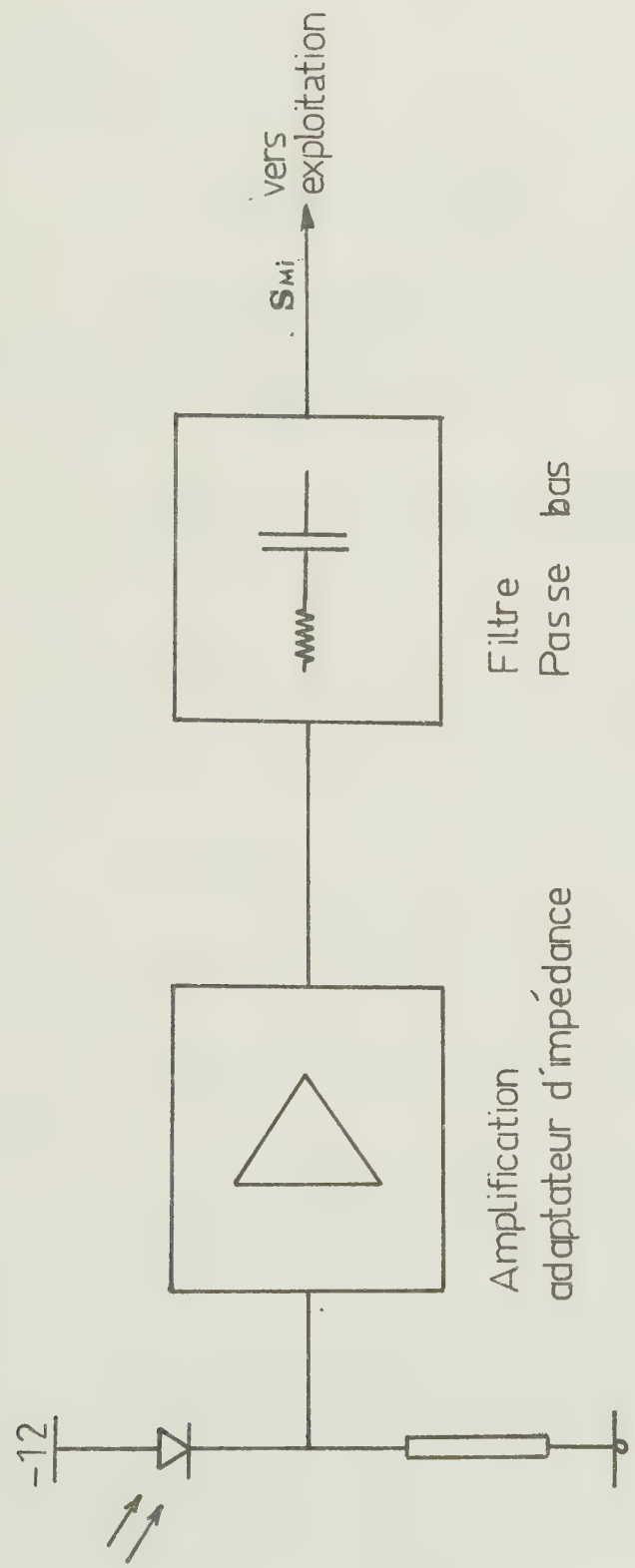

-12
Amplification
adaptateur d'impédance
Filtre
Passe bas
Smi
vers
exploitation

figure II-2

II - Impulsions de comptage

II.1 - Précision du comptage

Le nombre de franges N_q que nous devons compter au q^{e} cycle étant quelconque, la précision requise pour son comptage est fonction de celle que l'on veut obtenir pour le repérage d'une raie.

A partir des relations (1) du Fabry-Pérot :

$2n\ e\ \sigma = p \quad (1)$

et (12) du Michelson :

$2\ (n\ L - n_o\ L' - n_v\ e')\ .\ \sigma_{Hi} = p' \quad (12)$

nous obtenons :

$$dp' = \frac{-2\ n\ .\ L\ .\ \sigma_{Hi}}{\sigma}\ .\ d\sigma$$

A une variation finie $\delta\sigma$ de σ, il correspond δ N franges de Michelson :

$$\delta N = \frac{-2\ n\ .\ L\ .\ \sigma_{Hi}}{\sigma}\ .\ \delta\sigma$$

Application numérique :

$L = 25$ cm

$n \simeq 1$

$\sigma_{Hi} = \frac{10^8}{6328}\ cm^{-1}$

$$18000\ cm^{-1} < \sigma < 20000\ cm^{-1}$$

$$\delta N \simeq 40.\delta\sigma$$

Nous désirons connaître la position d'une raie avec une précision de 5 m K ; cela implique de pouvoir déterminer 0,2 frange, soit 1/5e de frange. Pour des raisons pratiques, nous compterons le 1/8e de frange.

II.2 - Détermination du 1/8e de frange

Le signal Michelson obtenu à la sortie du filtre est de la forme :

$$S_{Mi} = \alpha + \beta . \cos (\omega n + \varphi)$$

avec :

α	:	niveau moyen	
β	:	amplitude	
ω	=	$4\pi . \sigma_{Mi} . L$	) voir 1ère partie
φ	=	$4\pi . \sigma_{Mi} (n_o L' - n_v e')$	) chapitre III.

La détermination du 1/8e de frange est réalisée à l'aide de détecteurs de niveau à sortie logique. Au nombre de quatre, les détecteurs de niveau comparent le signal Michelson à des niveaux prédéterminés, régulièrement échelonnés entre $\alpha - \beta$ et $\alpha + \beta$. Leur sortie délivre un signal "0" ou "1" selon que le signal Michelson est inférieur ou supérieur au niveau de référence (figure II.3). Le basculement d'un détecteur d'un état logique à l'état complémentaire, déclenche une impulsion, qui une fois mise en forme est envoyée sur un compteur binaire.

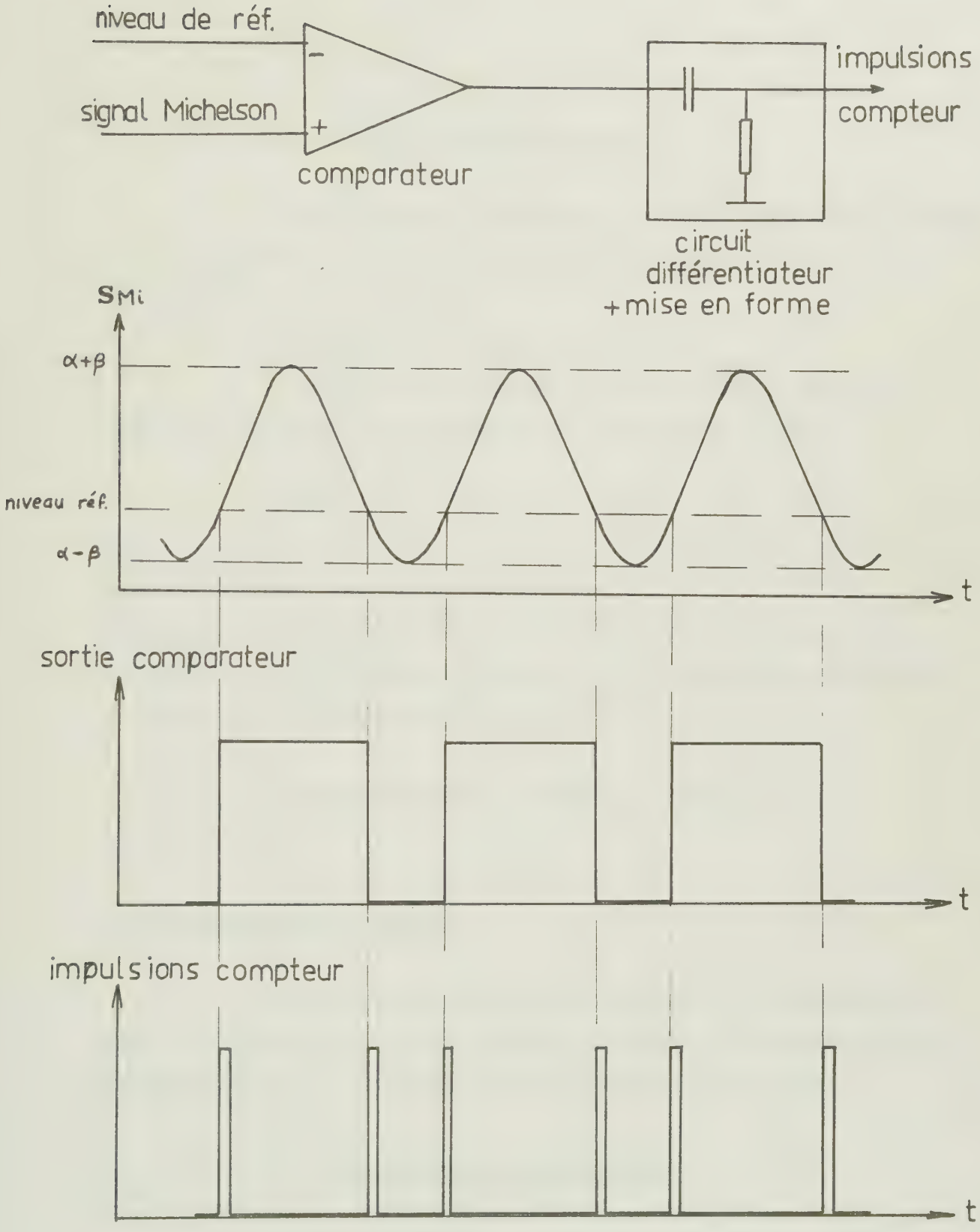

niveau de réf.
signal Michelson
comparateur
impulsions
compteur
circuit
différentiateur
+mise en forme
SMi
α+β
niveau réf.
α-β
t
sortie comparateur
t
impulsions compteur
t

figure II-3

II.3 - Prédétermination des niveaux

L'aspect théorique du problème tel qu'il vient d'être exposé, est compliqué du fait des fluctuations du niveau moyen et de l'amplitude du signal Michelson. Ces fluctuations sont dues :

- à l'instabilité de la source lumineuse.
- à l'apparition de gradients d'indice causés par des turbulences dans l'écoulement de l'azote lors d'une montée en pression dans la cellule.

Conséquemment, les niveaux de référence ne peuvent être fixes ; ils doivent être élaborés en fonction de α et β . A cette fin, nous utilisons deux détecteurs de crête à mémoire, enregistrant $\alpha - \beta$ et $\alpha + \beta$. Leur sortie alimente quatre ponts diviseurs, dont les points intermédiaires fournissent les niveaux de référence voulus. L'adaptation d'impédance avec le comparateur, est réalisée par un amplificateur opérationnel monté en suiveur.

Un schéma d'ensemble est donné par la figure II.4.

III - Sélection compte-décompte.

Le sens des variations de pression détermine le mode de comptage, compte ou décompte, des impulsions envoyées au compteur. Un traitement logique élaboré à partir du signal Michelson nous permet de déterminer ce mode.

III.1 - Quantification du signal Michelson

Le signal Michelson est converti en un mot binaire de quatre bits, par attribution d'un poids à chaque détecteur de niveau conformément au tableau ci-après :

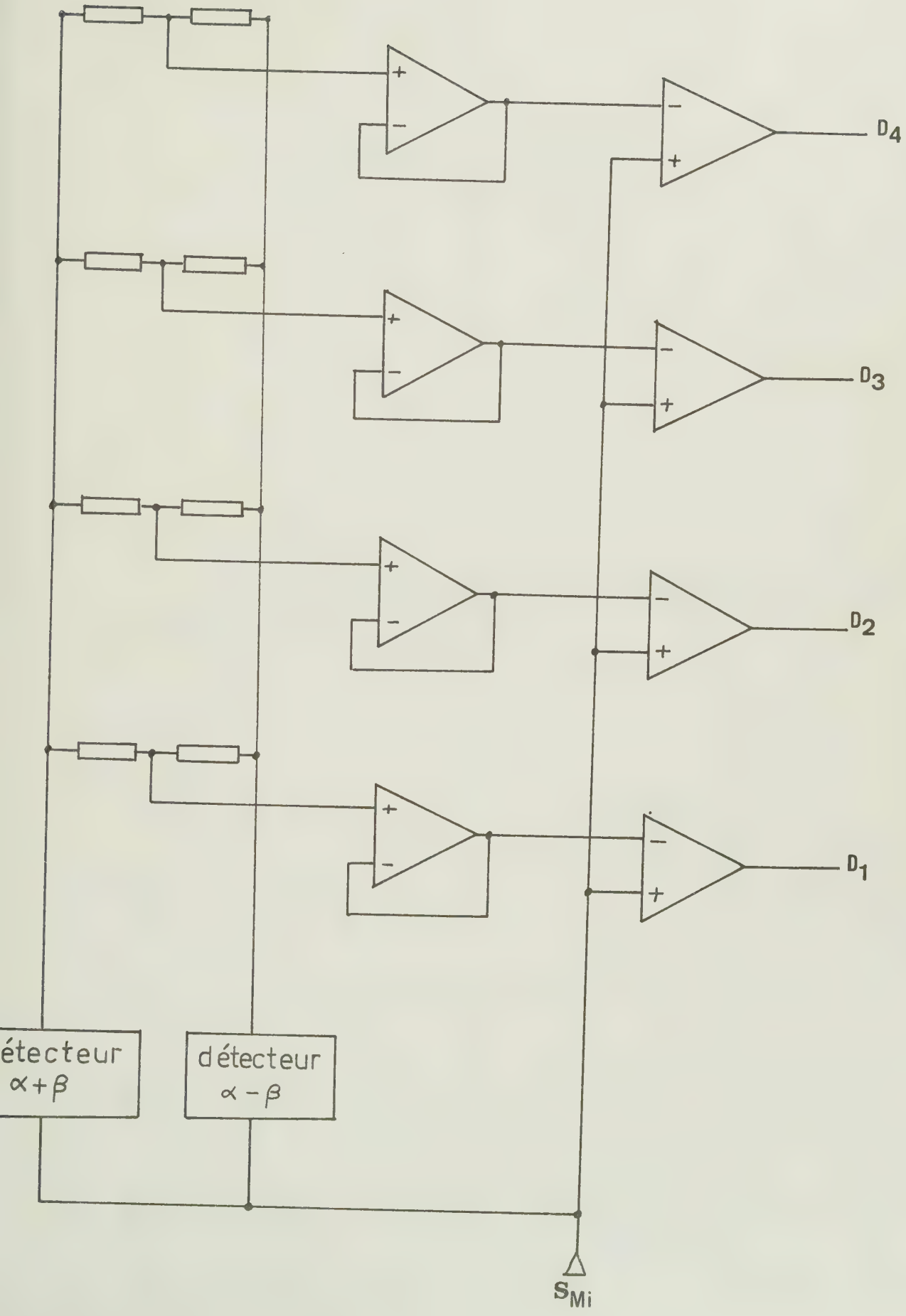
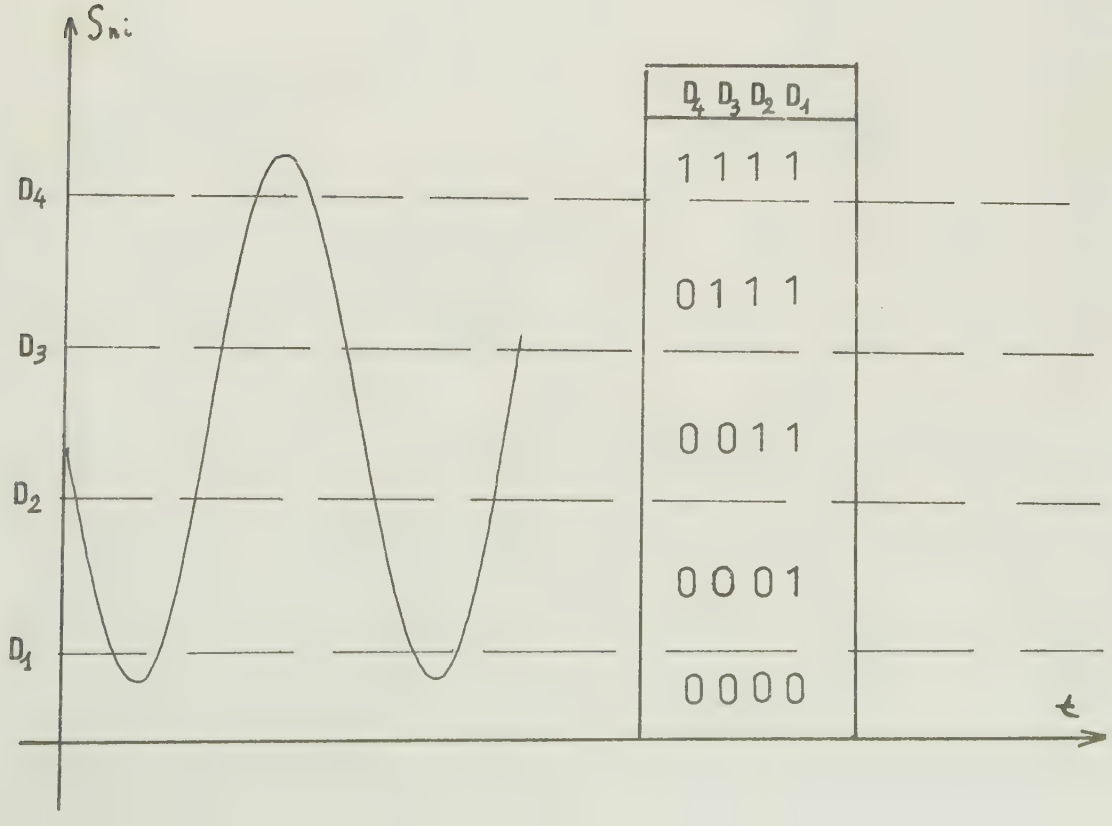


figure II-4

Niveau	Poids
D_1	2^0
D_2	2^1
D_3	2^2
D_4	2^3

La correspondance entre le signal analogique et le mot binaire s'effectue par zone selon la figure II.5.



II.2 - Contrôle des variations de pression

Les variations de S_{Hi} se traduisent par le diagramme séquentiel de la figure II.6.

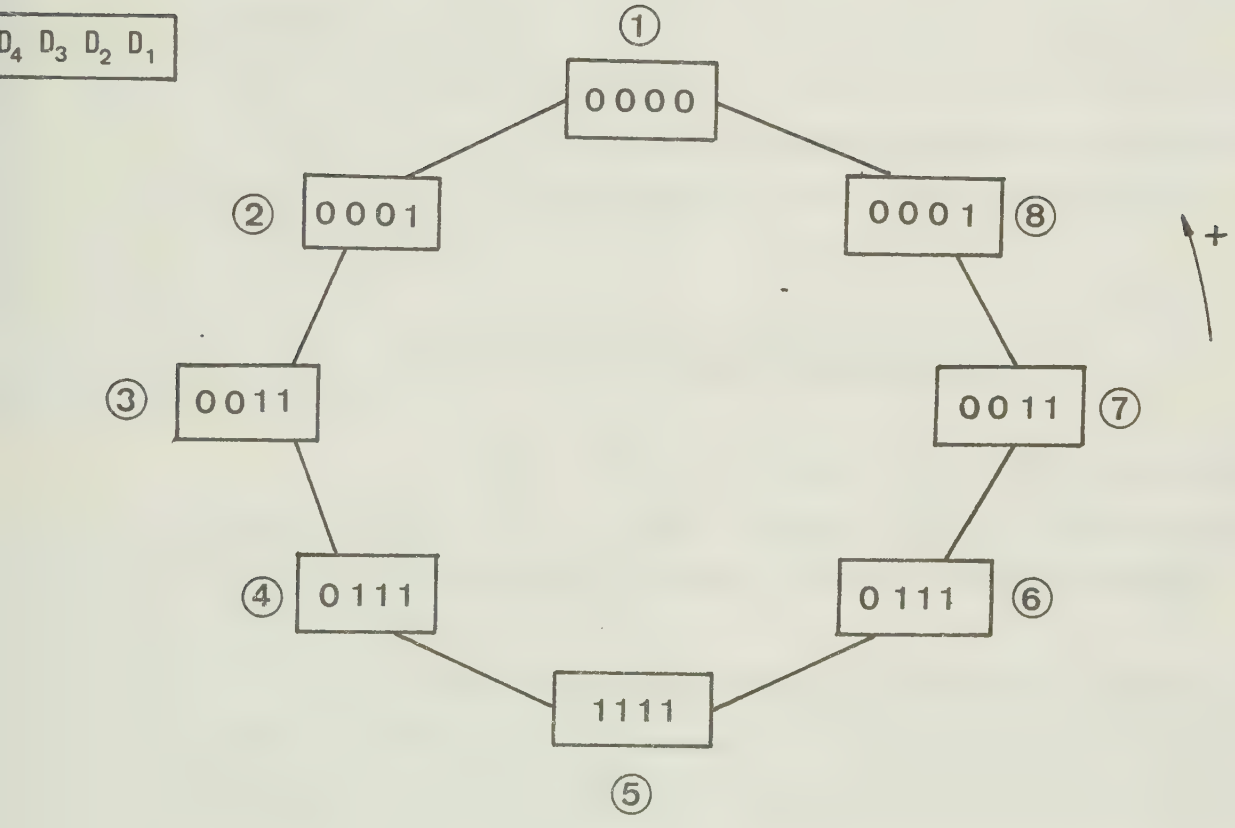


figure II-6

Supposons une augmentation de pression dans la cellule. Le diagramme séquentiel est parcouru dans le sens direct.

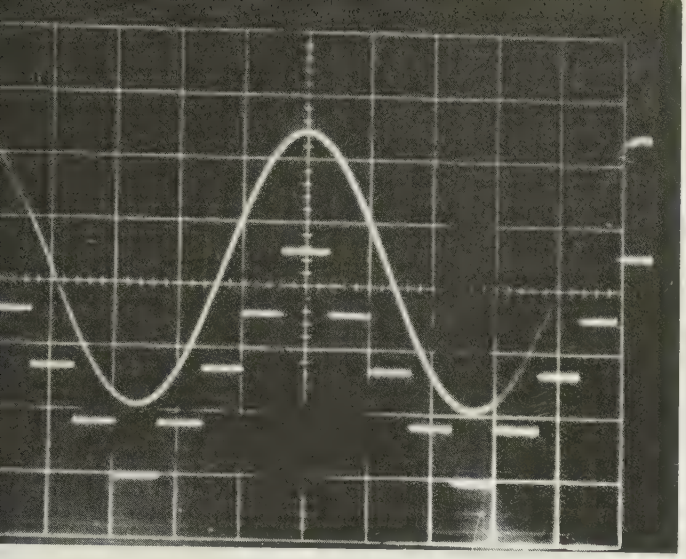
Supposons maintenant une diminution de pression. Le diagramme est alors parcouru dans le sens inverse.

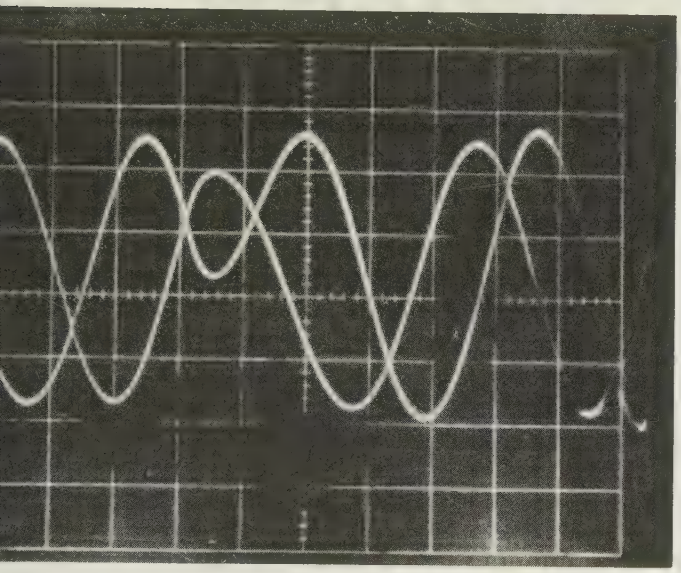
Si nous considérons un mot binaire, la connaissance du sens de parcours du diagramme séquentiel devrait nous permettre de prévoir le mot suivant. Le changement d'état logique d'un détecteur de niveau modifie le mot binaire. La comparaison du nouveau mot avec celui qui était prévu devrait permettre de déceler toute inversion de pression et commander éventuellement le changement de mode de comptage.

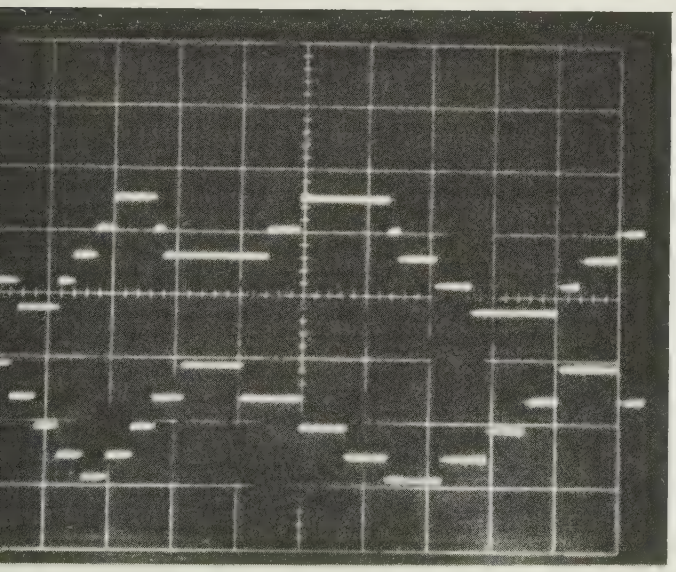
III.3 - Nécessité d'un 2e signal Michelson.

L'analyse précédente convient, sauf dans le cas ou l'inversion se produit sur le mot ① ou ⑤ . Les mots ② et ⑧ d'une part, ④ et ⑥ d'autre part, étant identiques, l'inversion n'est pas décelable.

Cette ambiguité peut être levée en utilisant un second signal Michelson traité de la même façon que le premier puis converti en un mot binaire. Le nouveau signal doit être déphasé par rapport au premier de telle sorte que les mots ① ou ⑤ ou ① et ⑤ ne soient pas présents simultanément sur les deux voies.







III.4 - Adjonction d'un compteur secondaire

Dans le cas d'une inversion de pression accidentelle pendant la phase d'enregistrement, celui-ci doit être stoppé jusqu'à ce que l'on soit revenu à la pression d'inversion. La première inversion agit sur une bascule qui coupe l'enregistrement et dirige les impulsions des 1/8e de frange vers un compteur secondaire préalablement remis à "0". (figure II.7). La seconde inversion positionne le compteur secondaire en mode décompte. Lorsque ce compteur passe à 0 une nouvelle action sur la bascule précédente remet en route l'enregistrement et dirige les impulsions des 1/8e de frange vers le compteur principal.

L'organigramme du fonctionnement des compteurs est représenté en annexe II.

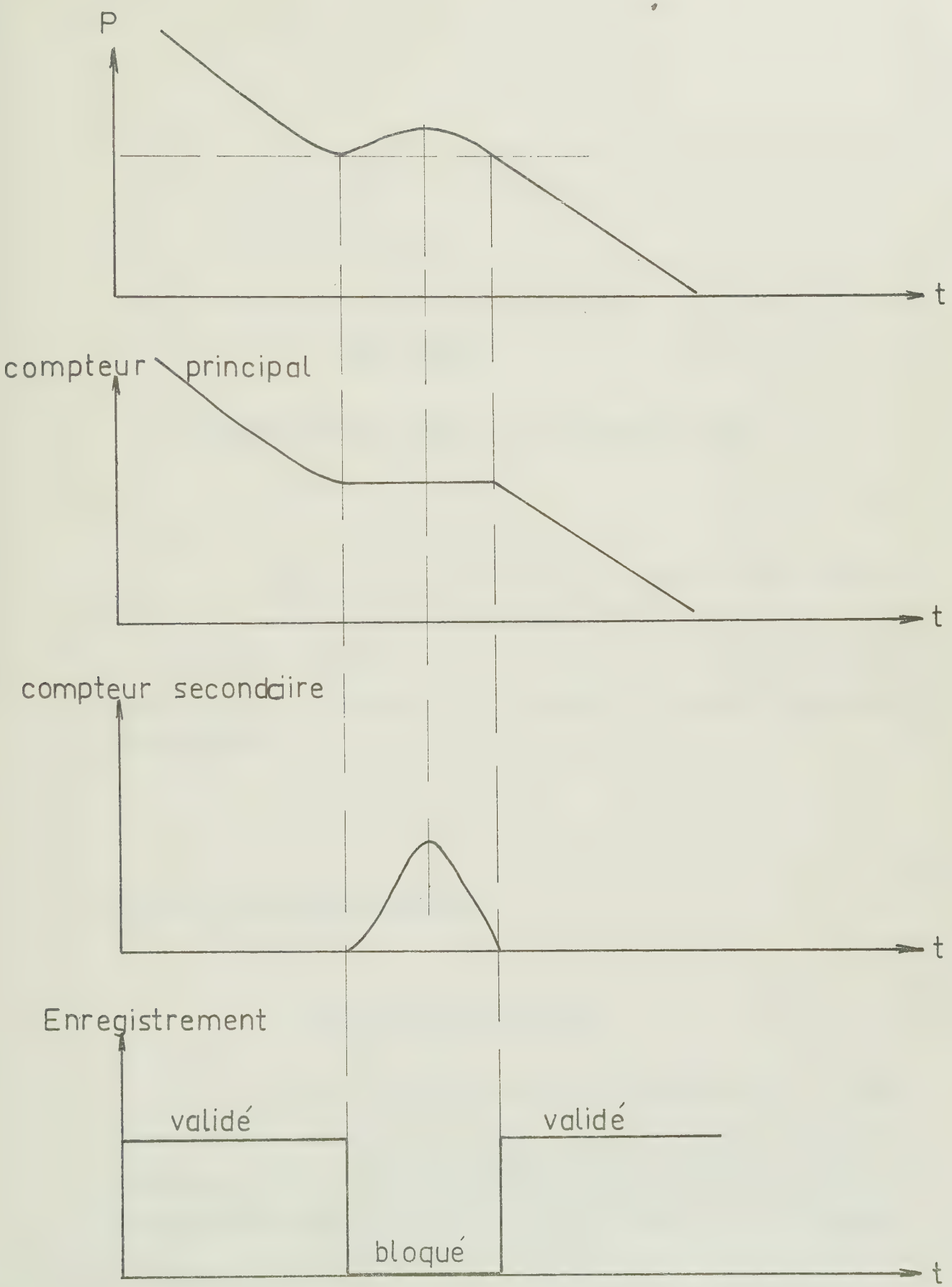

P
t
compteur principal
t
compteur secondaire
t
Enregistrement
validé
validé
bloqué
t

figure II 7

CHAPITRE III

ASSERVISSEMENT DU BALAYAGE EN NOMBRE D'ONDES

Dans le chapitre précédent nous avons précisé comment s'opère le comptage des franges Michelson qui détermine les limites du balayage de σ à chaque cycle. Nous détaillons ci-dessous l'asservissement qui en contrôle la vitesse afin de maintenir la coïncidence entre une fenêtre du Fabry-Pérot et celle du pré-monochromateur.

I - Schéma général de l'asservissement

I.1 - Définition du système asservi

Pendant la phase d'enregistrement, le nombre d'ondes σ de la radiation transmise par l'élément résolvant, varie comme la masse volumique du gaz baignant l'étalon de Fabry-Pérot (Cf 1ère partie, chapitre II). Le volume de la cellule d'analyse étant constant, la vitesse de balayage de σ est fonction

du débit massique d'azote. Elle peut être contrôlée en agissant sur l'ouverture d'une vanne maintenue en régime de saturation.

Nous avons montré précédemment (1ère partie chapitre III) que la vitesse de balayage $\frac{d\sigma}{dt}$ peut être mesurée par l'intermédiaire de la fréquence de défilement des franges Michelson $\frac{dN}{dt}$, tous les deux étant liés par une relation de la forme :

$$\frac{dN}{dt} = \frac{Kp}{\sigma^2} \cdot \frac{d\sigma}{dt}$$

où Kp est une constante dépendant du cycle.

D'autre part, nous pouvons remplacer cette loi théorique par une loi simplifiée :

$$\frac{dN'}{dt} = \frac{N_q}{T}$$

(N_q : nombre de franges balayées par cycle

T : durée du balayage)

en introduisant une erreur systématique négligeable.

En réalité, nous mesurons la période du signal Michelson.

I.2 - Schéma fonctionnel du système asservi.

De l'étude précédente, il découle le schéma fonctionnel de la figure III.1.

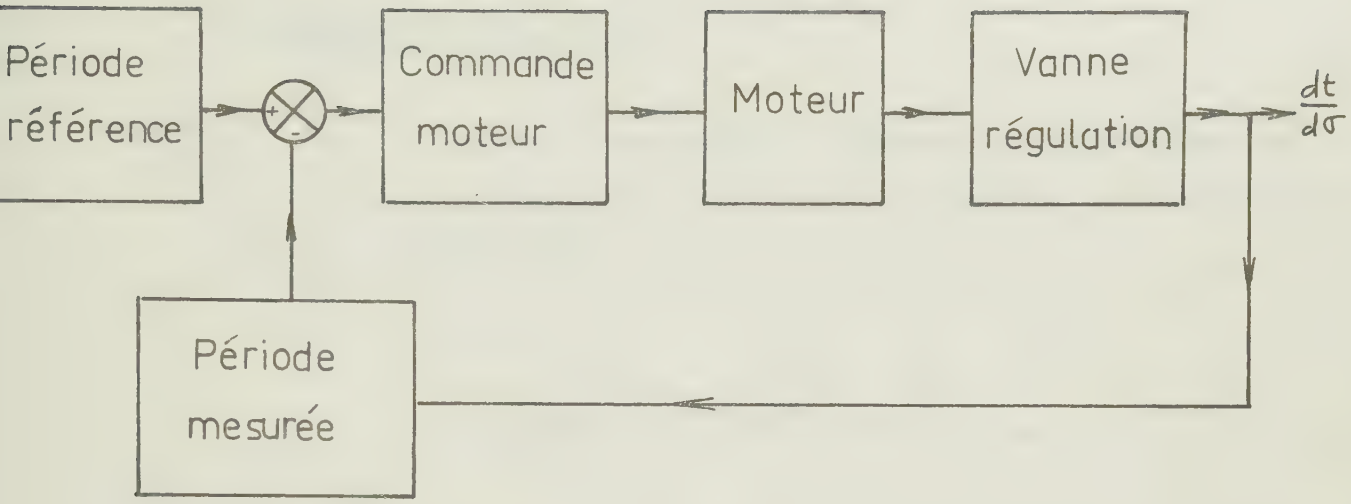


figure III-1

1.3 - Choix du type d'asservissement

Nous avons choisi un asservissement digital échantillonné. L'échantillonnage est imposé par la nature même de la mesure : une période. Le choix des techniques numériques a été orienté par les critères suivants :

- facilité de traitement des informations logiques : la mise en équations du système par l'algèbre de Boole, aboutit à des fonctions dont le cablage est simplifié par l'emploi de circuits intégrés.

- possibilité d'obtenir une très grande précision, limitée uniquement par les organes analogiques adjoints au système ; celle de la partie logique peut être accrue en augmentant la fréquence de l'horloge de pilotage.

II - Elaboration du signal d'erreur

Le signal d'erreur présenté à l'entrée de la chaîne d'action, est le résultat de la comparaison de la période du signal Michelson T_{Mi} et d'une période de référence T_q synchronisée par T_{Mi}.

II.1 - Mesure de la période Michelson : T_{Mi}

La mesure de T_{Mi} s'effectue par échantillonnage commandé par le signal Michelson lui-même. La sortie d'un des comparateurs de niveaux utilisés pour la détection des 1/8e de frange, pilote l'entrée d'horloge d'une bascule en T (figure III.2). La sortie Q de cette bascule change d'état à chaque front de montée du comparateur. La durée d'une période est donc égale au temps pendant lequel Q conserve un état déterminé (figure III.3).

II.2 - Synthèse de la période de référence : T_q

La période de référence T_q a pour expression :

$$T_q = \frac{T}{Nq}$$

avec :

T : durée du balayage

Nq : nombre de franges balayées

Nous avons montré précédemment que Nq est fonction de l'indice q

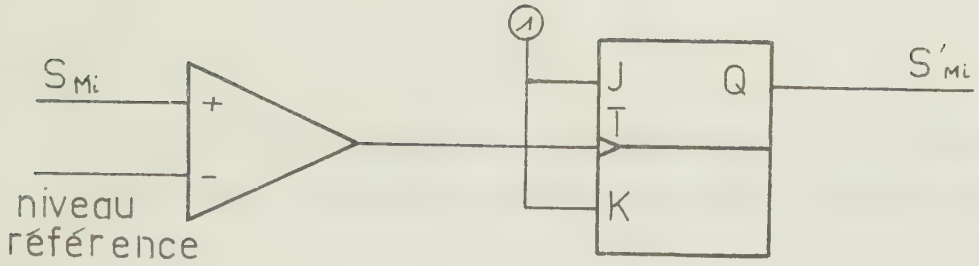


figure III-2

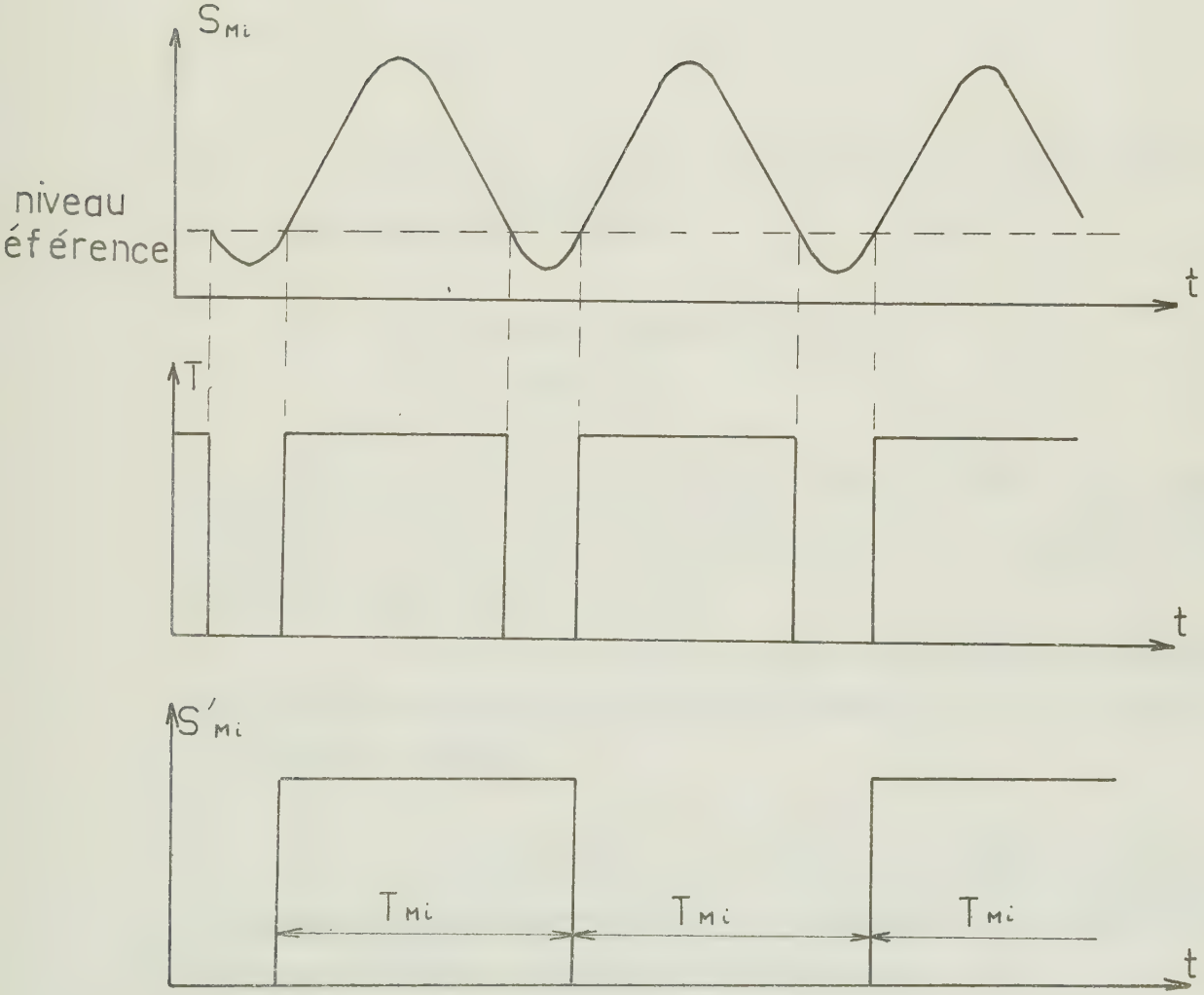


figure III-3

du cycle ; T étant une constante, il en résulte que T_q varie à chaque cycle. Nous devons réaliser une période de référence modifiable en fonction de q.

Si nous exprimons T_q par rapport à une unité de temps τ , il vient :

$$T_q = \frac{1}{Nq} \cdot \frac{T}{\tau} \cdot \tau$$

soient : $$Cq = P\left(\frac{1}{Nq} \cdot \frac{T}{\tau}\right)$$

et $$T'q = Cq \cdot \tau$$

Nous pouvons synthétiser T'q à partir d'une horloge de période τ, associée à un compteur binaire prépositionné avec Cq.

Des relations précédentes nous tirons :

$$Tq - T'q < \tau$$

Si nous employons T'q en tant que période de référence, celle-ci sera d'autant plus exacte que τ sera petit. La valeur maximale de τ est fixée par la précision voulue sur le positionnement d'une raie.

Ainsi une erreur maximale de 5 m K sur un balayage de 2000 cm^{-1} avec une période Michelson de l'ordre de 5s nécessite $\tau \leq 12{,}5\ \mu s$, soit une fréquence de 80 kHz.

Le schéma que nous avons retenu pour synthétiser la période de référence est représenté par la figure III.4. Le front de montée de T_{ni} déclenche une impulsion de synchronisation dont le rôle est triple :

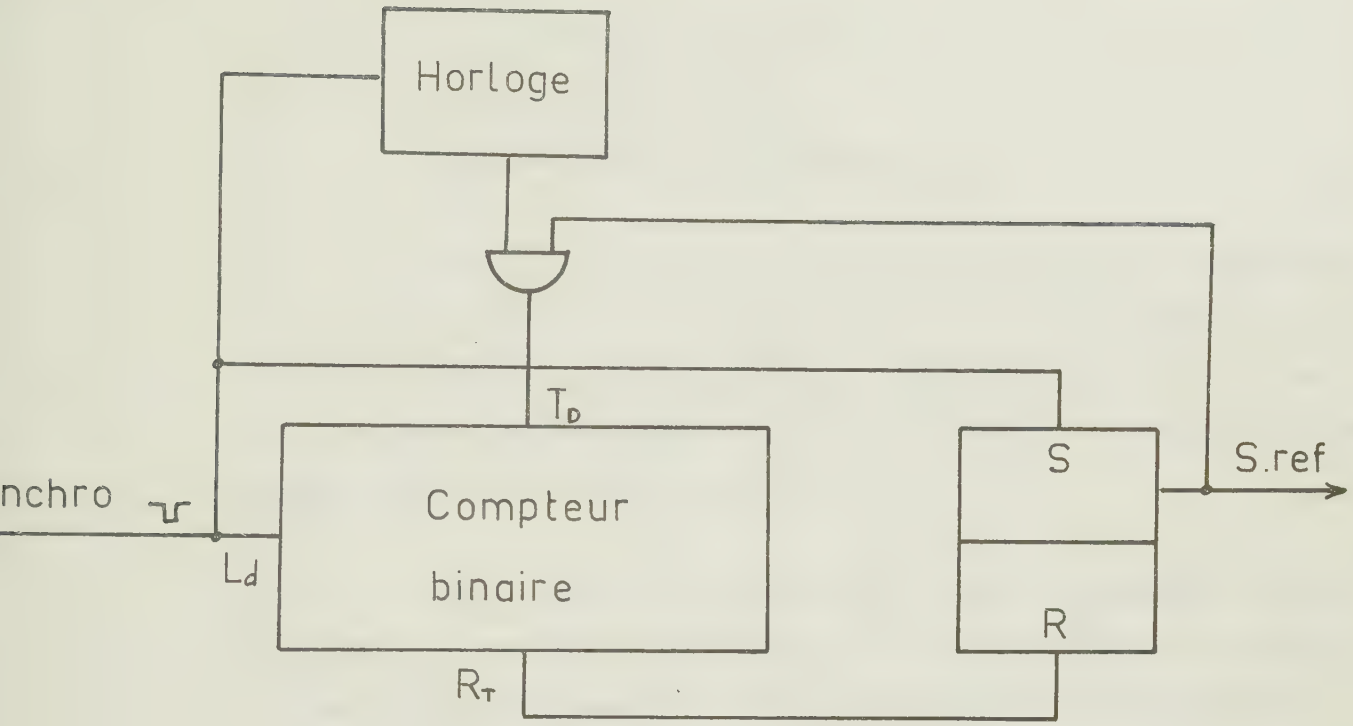


figure III-4

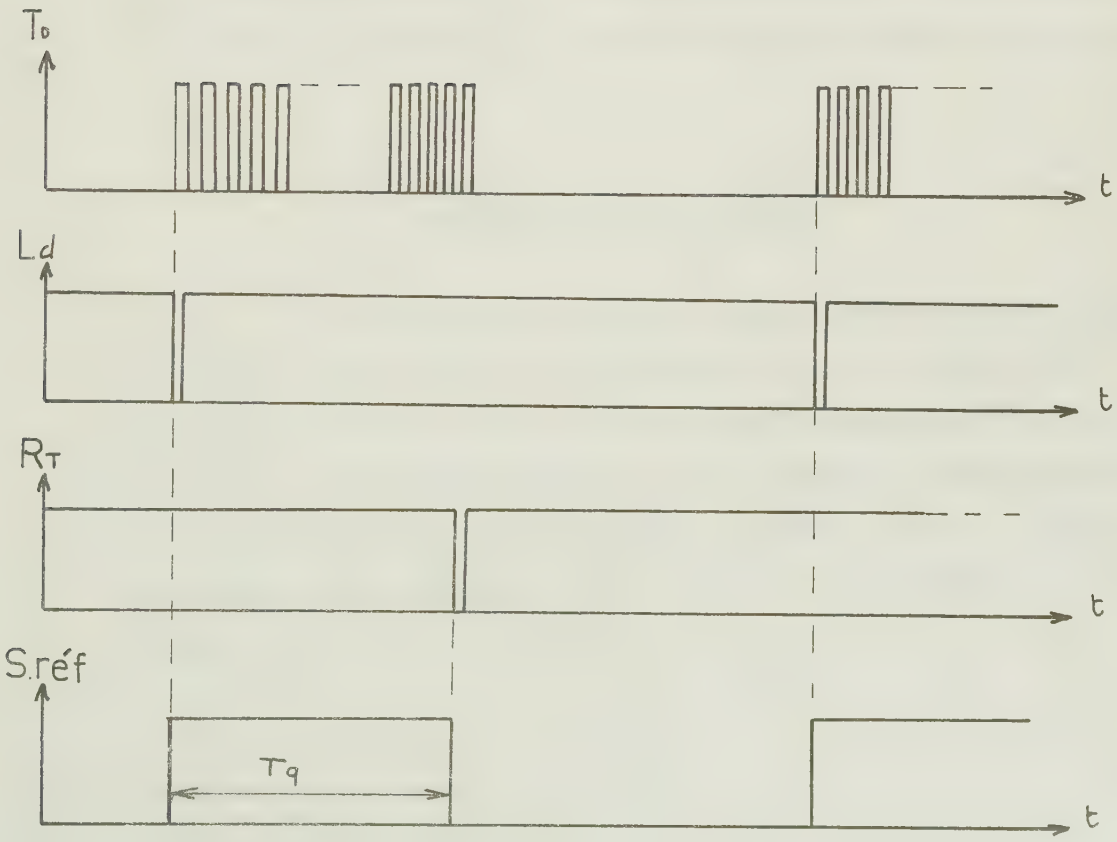


figure III-5

- prépositionner le compteur binaire avec Cq par action sur l'entrée La
- synchroniser l'horloge
- placer la sortie de la bascule R-S à l'état "1".

Dès lors, la porte ET est validée ; les impulsions d'horloge attaquant l'entrée T_D du compteur sont décomptées (figure III.5). Lorsque celui-ci est vide, il apparaît une impulsion sur la sortie R_t qui commande la mise à "0" de la bascule R.S. La porte ET est alors inhibée. La période de référence T'q correspond au temps pendant lequel la sortie de la bascule est à l'état "1".

Notons que l'horloge est réalisée à partir d'un oscillateur à quartz d'une fréquence de 2 MHz et de stabilité $10^{-7}/°$ C. Cette fréquence est ensuite divisée par 10. La fréquence ainsi obtenue est conforme à celle requise par la précision de 5mK.

Notons encore que l'impulsion de synchronisation étant commandée par un front de montée de T_{Hi}, la période de référence n'est déclenchée qu'une fois sur deux (figure III.7). La correction s'effectue pendant la seconde période.

II.3 - Composition des deux périodes

Les deux signaux que nous devons comparer prennent simultanément le niveau 1 et retombent à 0 indépendamment l'un de l'autre. L'écart $T'q - T_{Hi}$ est égal à l'intervalle de temps, compté algébriquement, entre le front de descente de Sréf , pris comme origine et le front de descente correspondant de S'_{Hi}. Une porte OU exclusif dont les entrées sont reliées à Sréf et S'_{Hi} (figure III.6) voit donc sa sortie prendre le niveau 1 pendant un temps égal à $|T'q - T_{Hi}|$ (figure III.7).

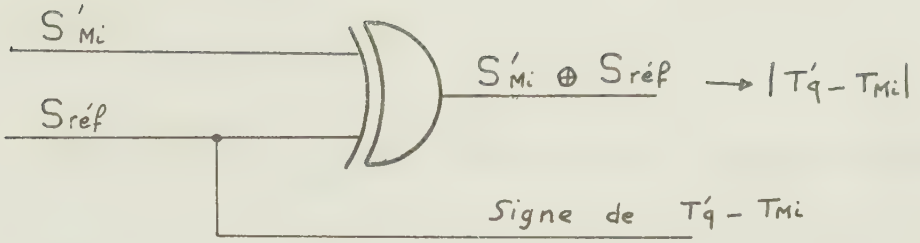


figure III - 6

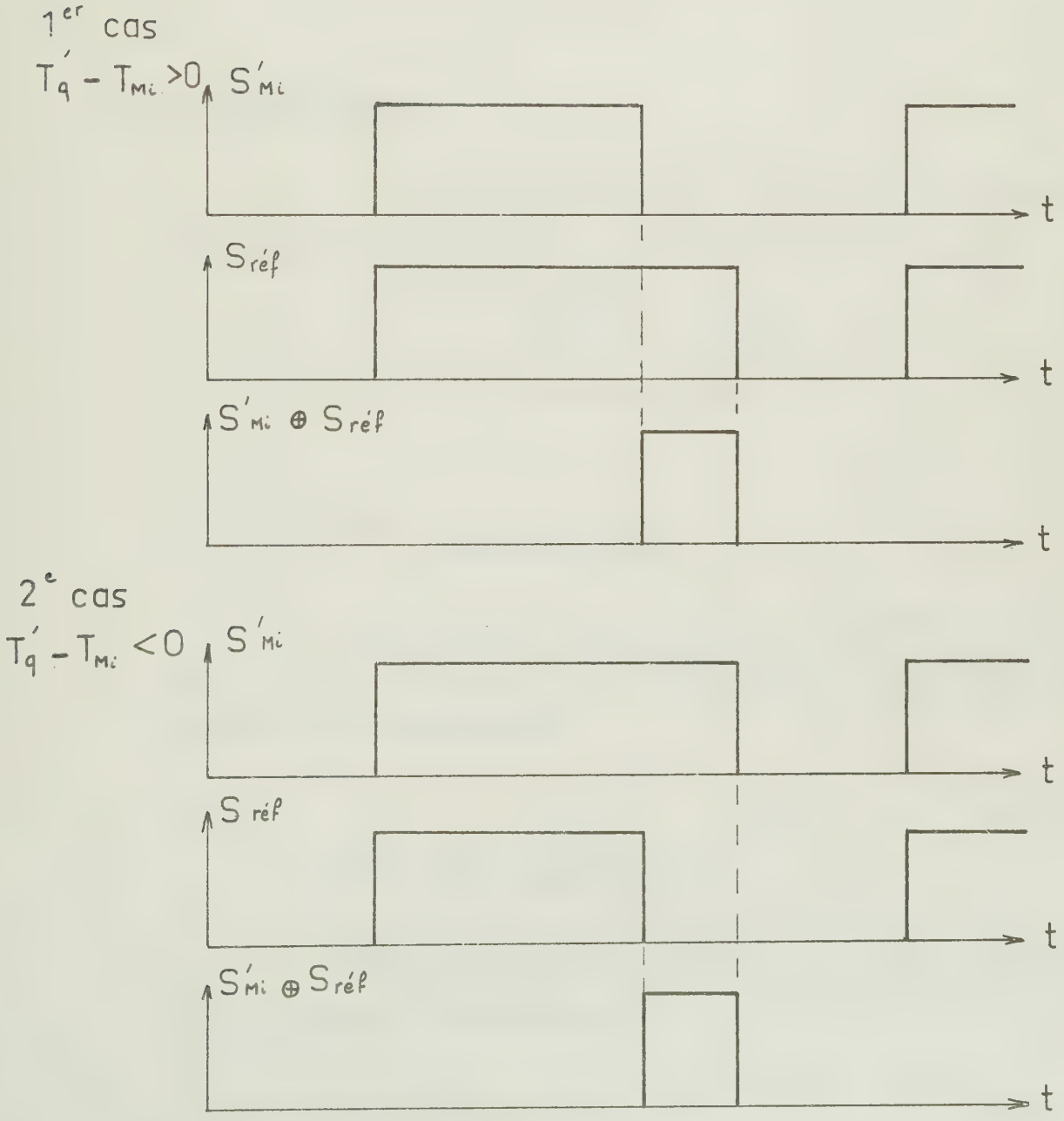


figure III 7

Le signe de $T'q - T_{Mi}$ est fourni par Sréf suivant le code ci-dessous :

Sréf = 1 : $T'q - T_{Mi} > 0$

Sréf = 0 : $T'q - T_{Mi} < 0$

III - Chaîne d'action

La chaîne d'action doit corriger le débit d'azote en fonction du signal d'erreur précédemment élaboré. Elle est essentiellement constituée par :

- une vanne de régulation
- un moteur d'entraînement couplé à la vanne
- un circuit de commande du moteur

III.1 - Vanne de régulation

Nous utilisons une vanne de précision type 22RS4 de la société Whitey . Cette vanne est munie d'une vis d'entrainement micrométrique permettant un règlage de débit très progressif.

III.2 - Moteur d'entraînement

L'entraînement de la vanne est réalisé par un moteur pas à pas type P.D.16 à 8 phases de la société Sédélem.

Le choix de ce moteur a été orienté par les critères suivants :

- positionnement précis
- absence d'oscillation
- temps de réponse inférieur à celui des autres types de moteur.

L'alimentation séquentielle des bobines du moteur est assurée par un commutateur électronique constitué par un compteur en anneau réversible à 4 bits dont chaque sortie est suivie d'un étage de puissance.

III.3 - Commande du moteur

Le rôle de la commande moteur est de convertir le signal d'erreur obtenu précédemment en un certain nombre d'impulsions assimilables par le compteur en anneau.

Elle est représentée par la figure III.8. Un oscillateur Osc1synchronisé par les fronts de montée de $S'_{ni} \oplus$ Sréf envoie des impulsions sur l'entrée d'une porte ET. Cette porte est validée par $S'_{ni} \oplus$ Sréf pendant un temps égal $\left| T'q - T_{ni} \right|$. Le train d'impulsions obtenu en sortie de la porte alimente le compteur en anneau, tandis que le sens de rotation est précisé par Sréf (signe de $T'q - T_{ni}$) (figure III.9).

La correction minimale que peut apporter le système est d'un pas moteu celle-ci correspond à un écart $\left| T'q - T_{ni} \right|_{mini}$. Un écart inférieur à cette valeur ne doit pas entraîner de correction. Dans ce but, le déclenchement de l'oscillateur est retardé par rapport au front de montée de $S'_{ni} \oplus$ Sréf d'une durée égale à $\left| T'q - T_{ni} \right|_{mini}$. Ceci permet également d'inhiber l'action des parasites sur le signal d'erreur.

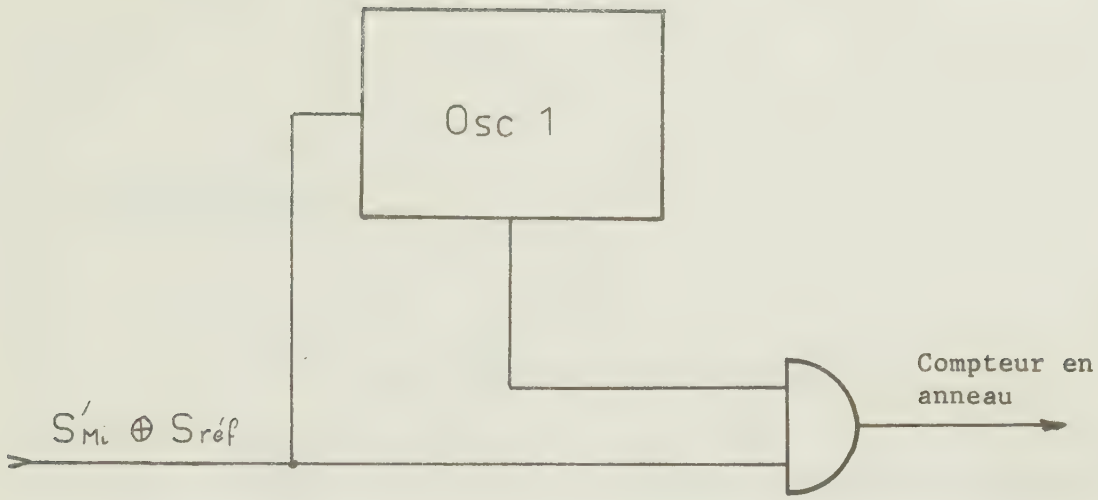


figure III 8

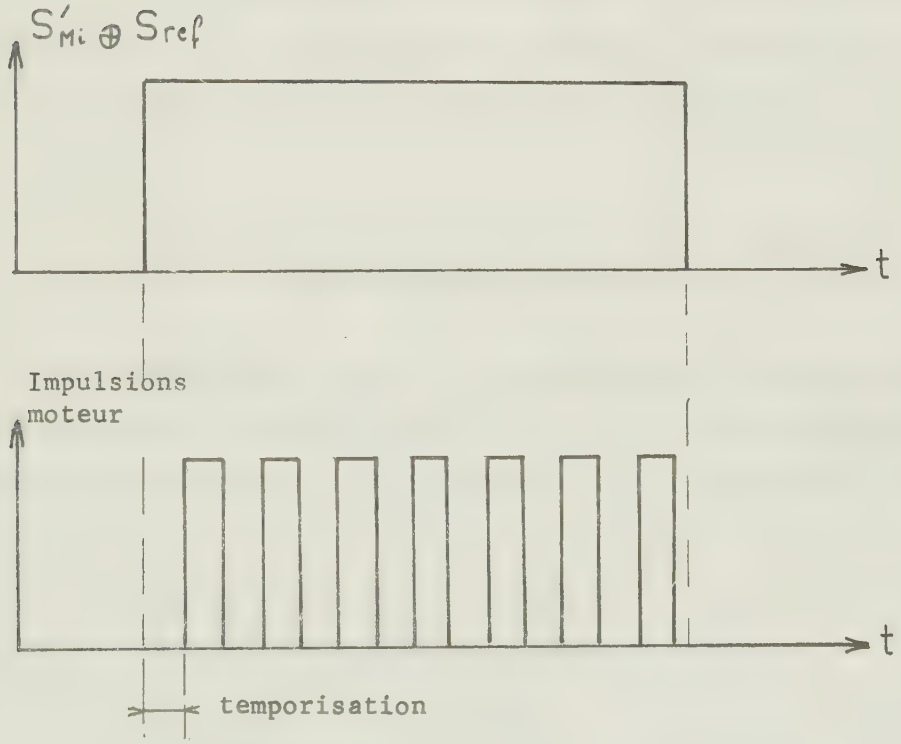


figure III 9

IV - Correction somme

IV.1 - Nécessité d'une correction somme

L'asservissement tel que nous venons de le décrire, contrôle la période du signal Michelson par une action proportionnelle à $T'q - T_{mi}$. Or, du fait de l'échantillonnage, la correction n'intervient qu'une période sur deux. Entre deux corrections, la cellule se vidant, T_{mi} à tendance à augmenter. Il en résulte un effet de trainage qui peut être mis en évidence sur les franges Michelson et est cause d'une erreur systématique sur le positionnement d'une raie (figure III.10).

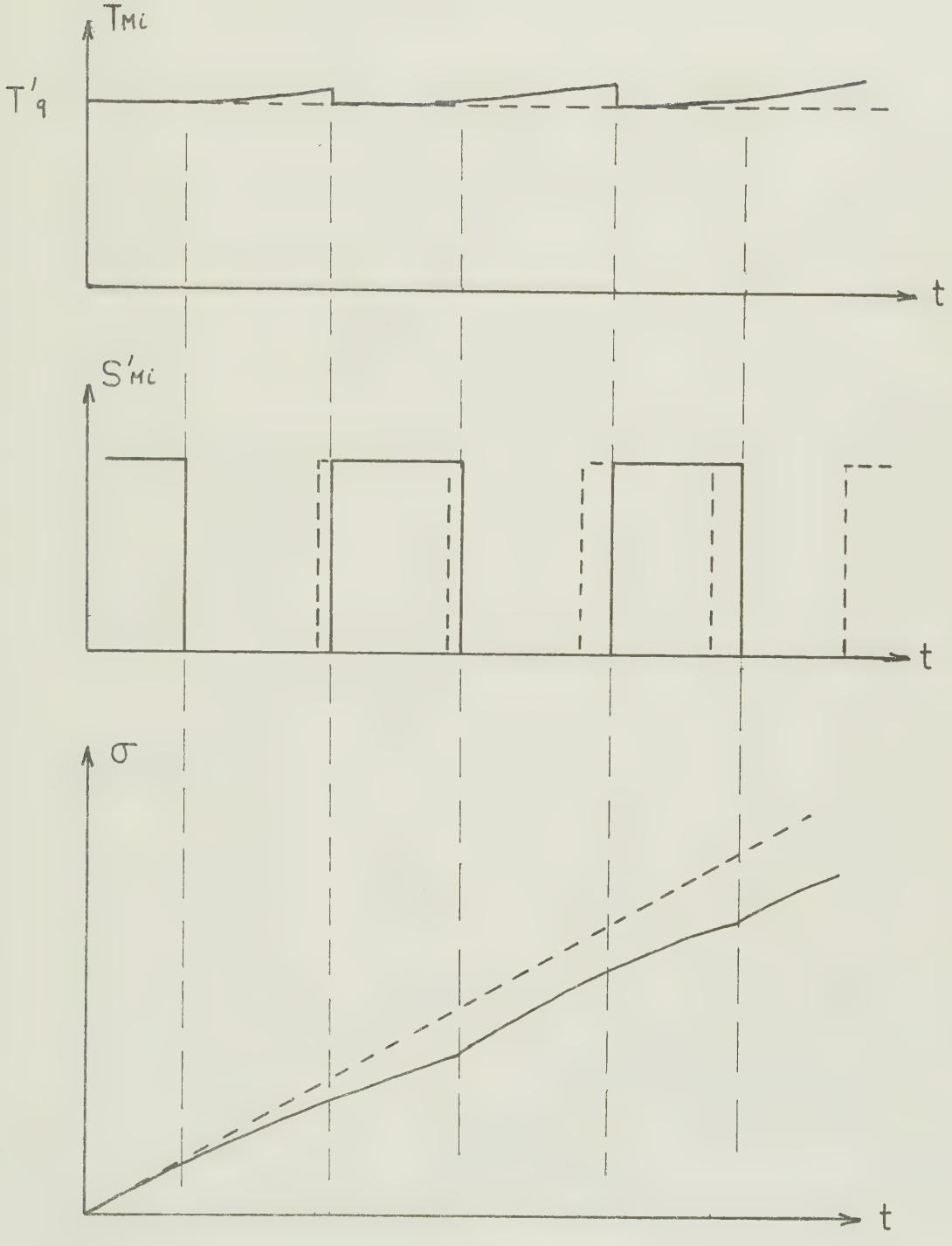
Nous sommes donc amenés à établir une correction somme, proportionnelle à $\Sigma (T'q - T_{mi})$, afin de diminuer cet effet. Cette correction peut être comparée à la correction intégrale dans un asservissement analogique.

IV.2 - Détermination de l'écart somme : $\Sigma (T'q - T_{mi})$

Reprenons le signal S'_{mi} du paragraphe II et assignons des indice croissants aux fronts successifs (figure III.11). Effectuons la même opération avec un nouveau signal de référence S'réf de période 2.T'q, synchronisé par le front d'indice 0 de S'_{mi}.

Pour la i^{e} période, nous pouvons écrire :

$$\sum_{o}^{i} (T'q - T_{mi}) = \sum_{o}^{i} T'q - \sum_{o}^{i} T_{mi}$$



---- courbe idéale

——— courbe réelle

figure III-10

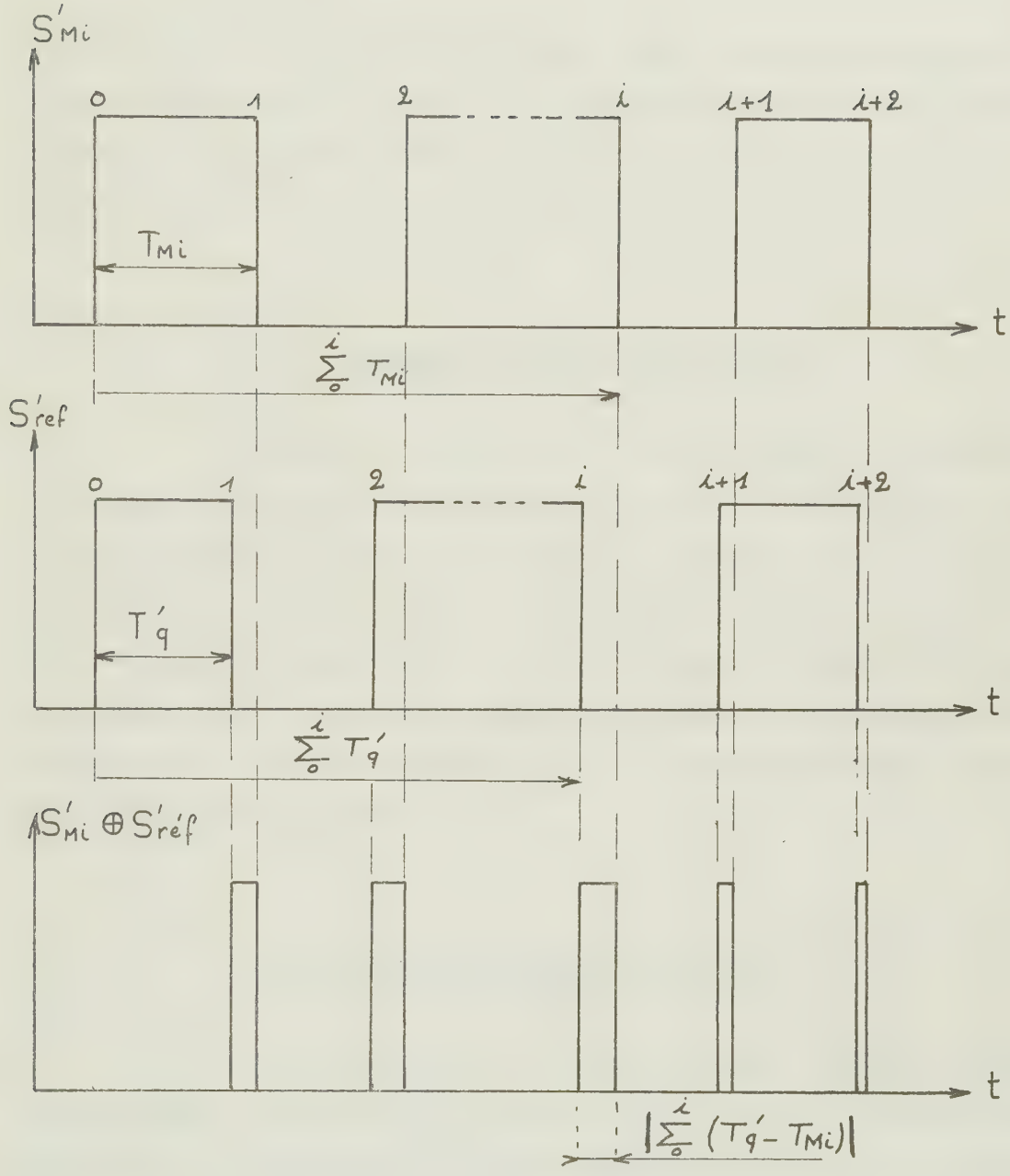


figure III - 11

Or $\sum_{o}^{i} T'q$ et $\sum_{o}^{i} T_{ni}$ représentent respectivement l'intervalle de temps entre les fronts d'indices 0 et i de S'réf et S'_{ni}. L'écart somme cherché est donc égal à l'intervalle de temps compté algébriquement entre le front d'indice i de S'réf, pris comme origine, et le front d'indice i de S'_{ni}.

IV.3 - Synthèse du signal de référence : S'réf

Le schéma du synthétiseur de S'réf est dérivé de celui de Sréf donnant T'q (figure III.12). Nous retrouvons l'horloge de référence, de période τ, dont les impulsions attaquent l'entrée "décompte" d'un compteur binaire. Un signal de synchronisation, déclenché par le front d'indice 0 de S'_{ni}, charge le compteur avec Cq, déclenche l'horloge et met à 1 la bascule donnant S'réf (figure III.13). Lorsque le compteur passe à 0 une impulsion apparaît sur la sortie R_t du compteur qui fait basculer S'réf et recharge le compteur avec Cq sans arrêter l'horloge. Un nouveau décompte peut alors commencer.

IV.4 - Réalisation de la correction somme

La correction somme est réalisée de la même façon que la correction proportionnelle : les deux signaux déterminant l'écart somme sont présentés sur les entrées d'une porte OU exclusif ; la sortie de cette porte est au niveau 1 pendant un temps égal à $\left| \sum (T'q - T_{ni}) \right|$. Toutefois, afin de ne pas faire interférer les deux corrections, proportionnelle et somme, nous les avons séparées de la manière suivante :

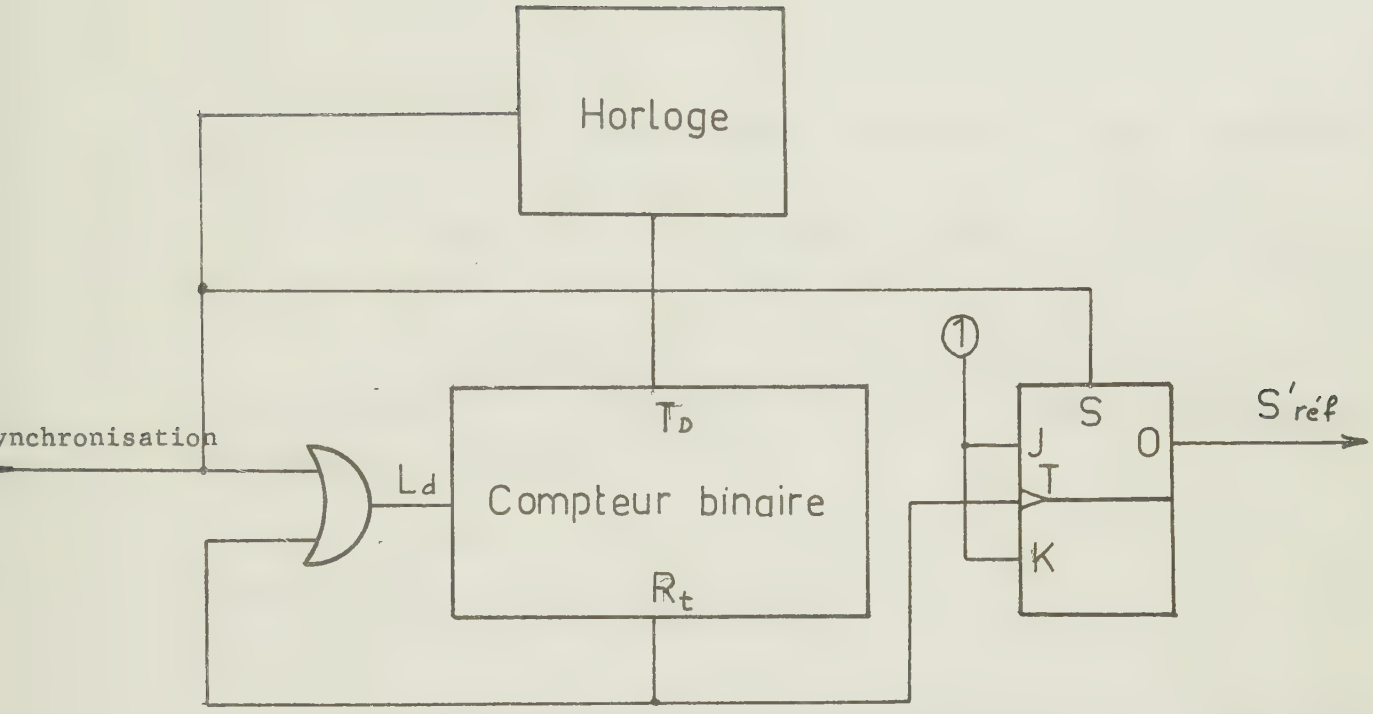


figure III 12

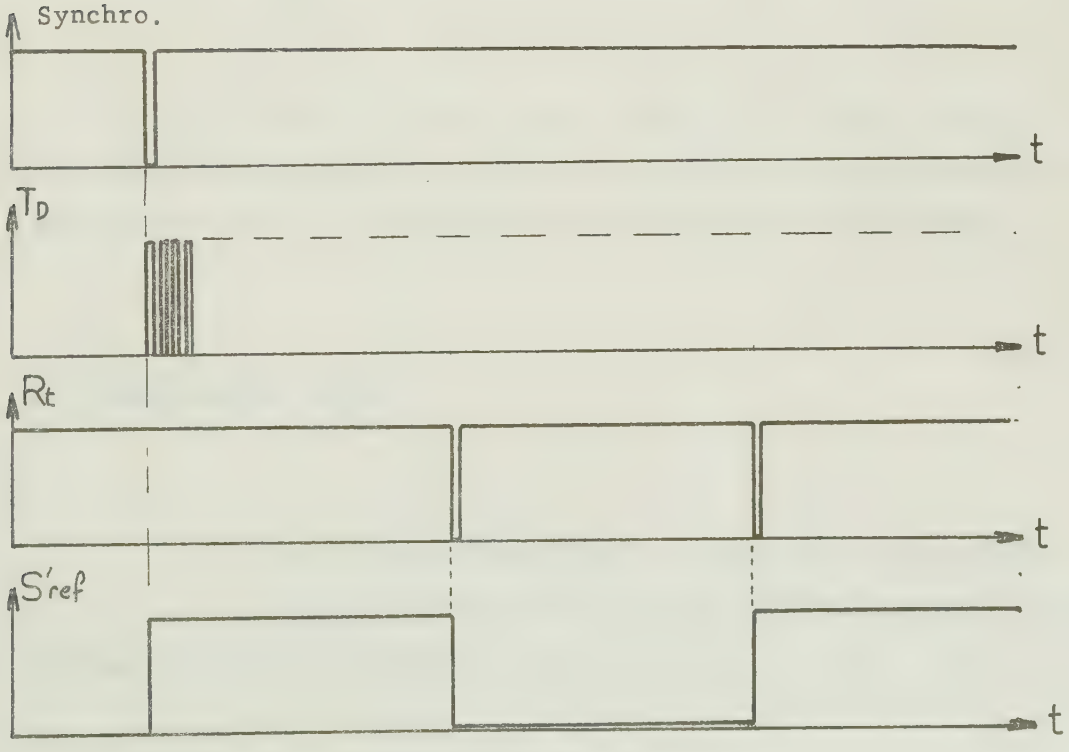


figure III 13

- correction proportionnelle : déclenchée par les fronts de descente de S'_{Mi}

- correction somme : déclenchée par les fronts de montée de S'_{Mi}

La comparaison de S'_{Mi} et S'réf provoquerait une correction somme sur tous les fronts de S'_{Mi} ; pour répondre aux conditions imposées, nous comparons donc deux nouveaux signaux :

$\frac{S'_{Mi}}{2}$ et $\frac{S'réf}{2}$ (figures III.14 et III.15).

Le signe de $\sum (T'q - T_{Mi})$ est donné par S'réf avec le code suivant :

S'réf = 1 : $\sum (T'q - T_{Mi}) > 0$

S'réf = 0 : $\sum (T'q - T_{Mi}) < 0$

Ces deux signaux attaquent une chaîne d'action identique à celle de la correction proportionnelle. L'action de la correction somme peut être contrôlée par la fréquence de l'oscillateur de commande du compteur en anneau.

V - Asservissement complet

L'asservissement complet est représenté par la figure III.16.

Le diagramme séquentiel (figure III.17) fait apparaître, en alternance, les temps de correction proportionnelle et somme.

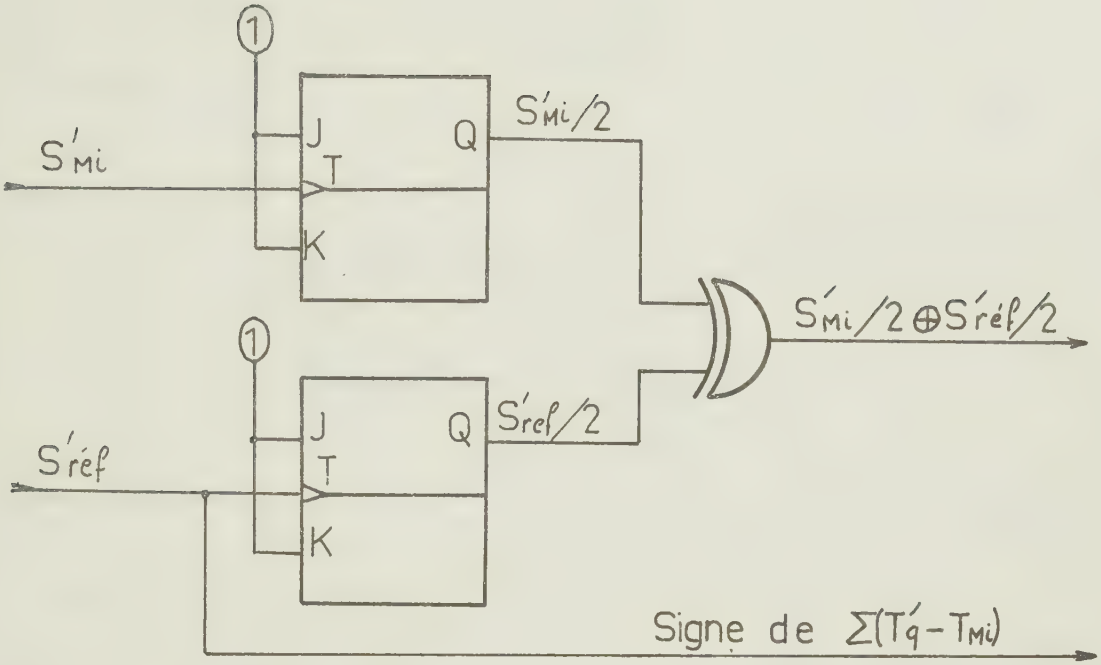


figure III 14

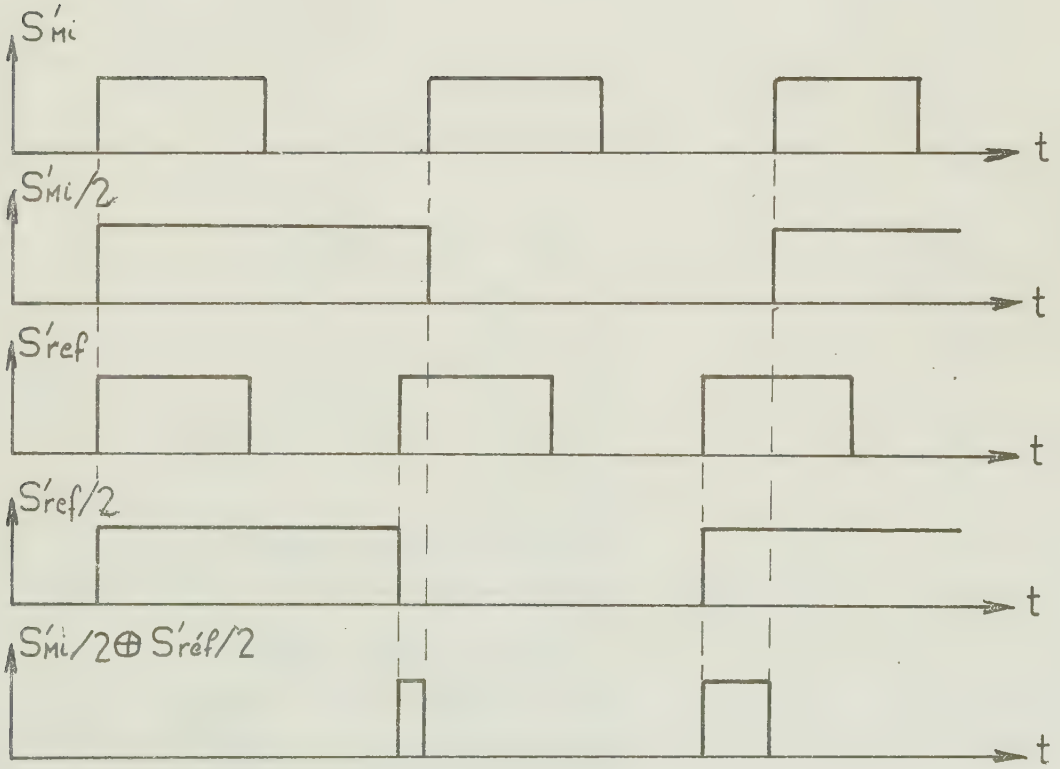


figure III 15

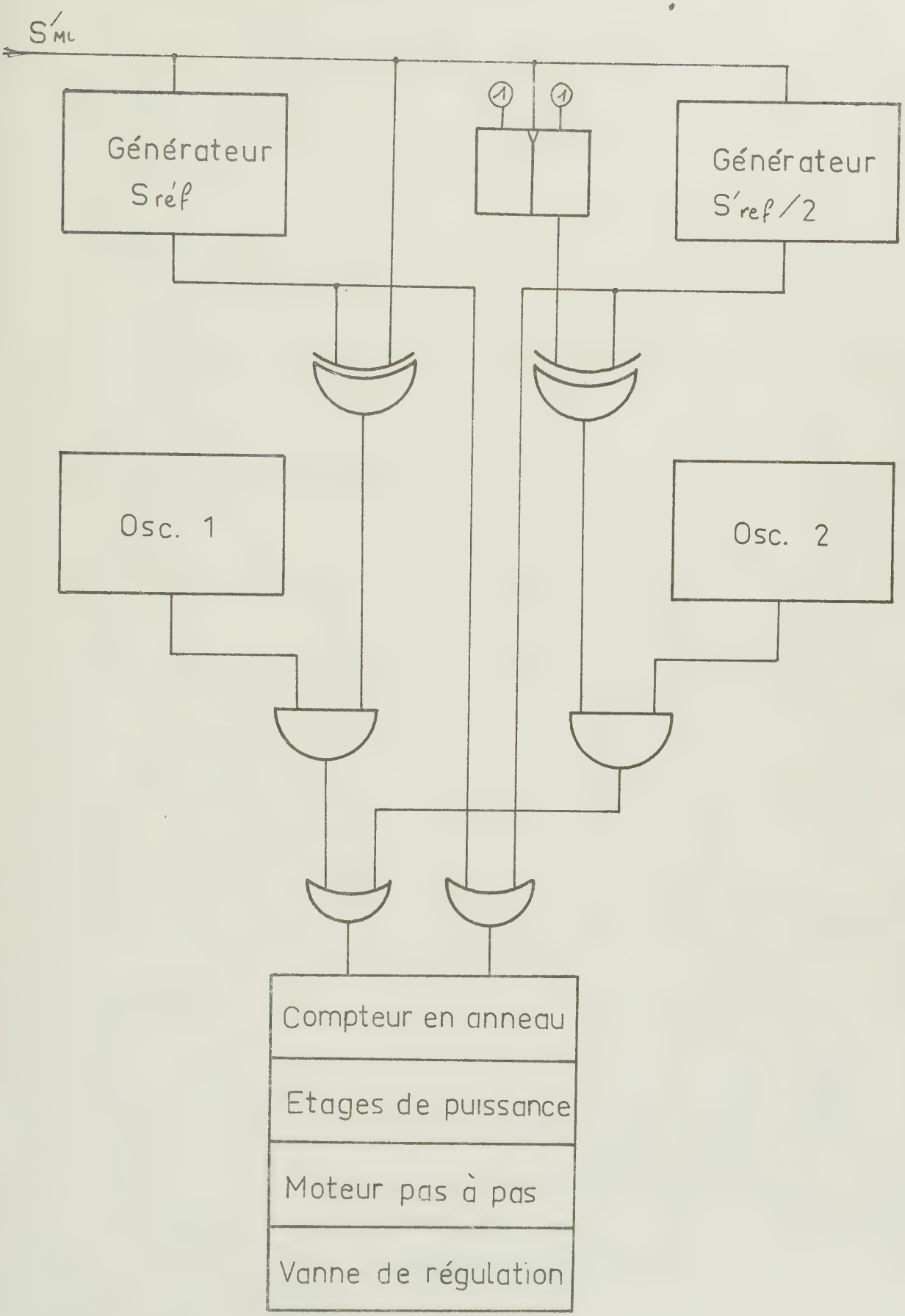


figure III - 16

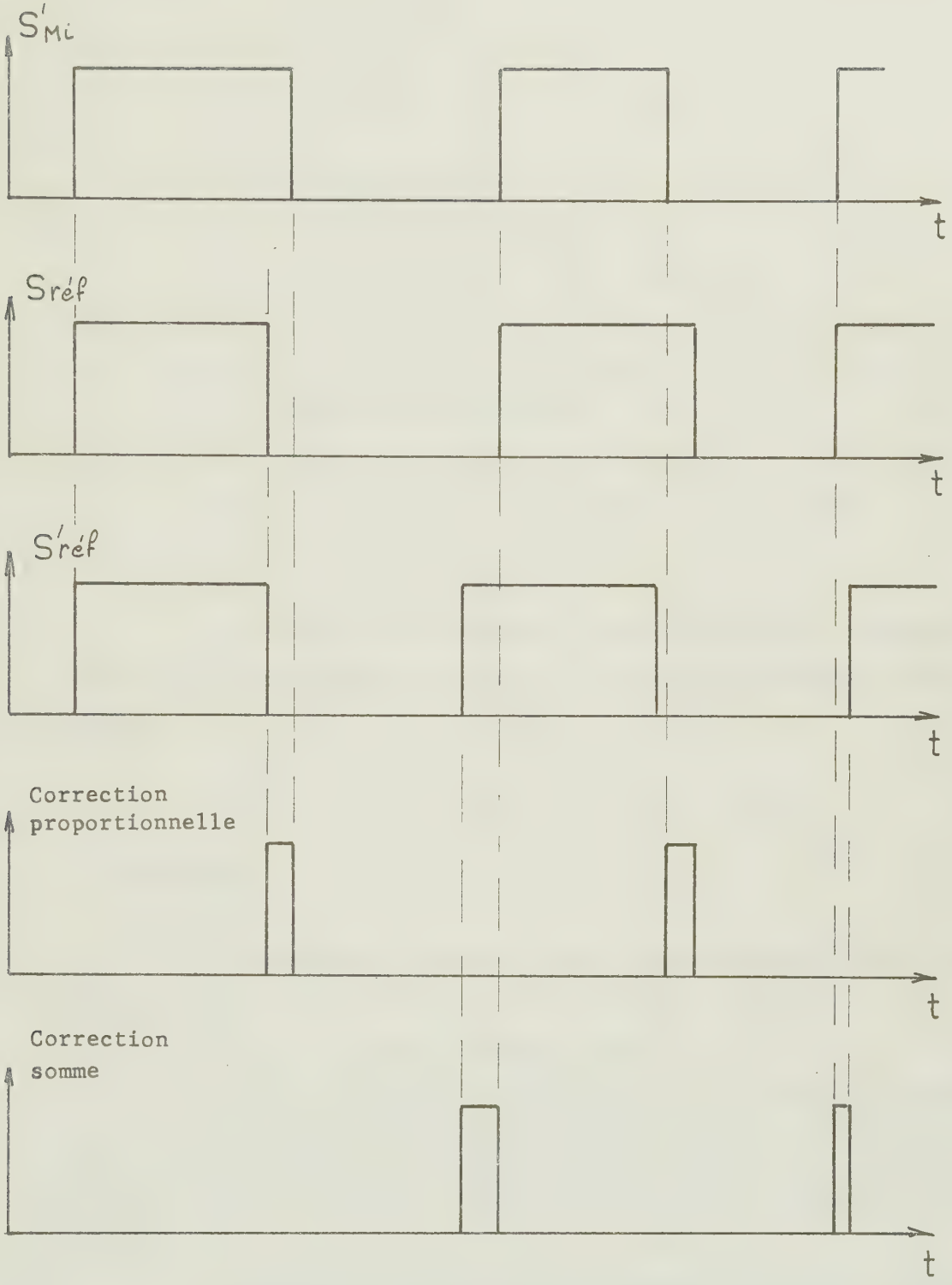


figure III 17

CHAPITRE IV

DISPOSITIFS ANNEXES

A côté des organes essentiels : compteur de franges, asservissement, nous trouvons plusieurs dispositifs annexes. Deux d'entre eux sont décrits dans ce chapitre.

I - Bloc de calcul

Le compteur de franges et l'asservissement requièrent deux données fondamentales :

- Nq le nombre de franges à balayer
- Cq le nombre de périodes élémentaires constituant la période de référence de l'asservissement. Ces données dépendent du cycle et doivent être déterminées au début de chacun de ceux-ci. Deux procédés peuvent être envisagés :

1 - Les données sont calculées à l'avance et introduites en début de manipulation dans une mémoire à lecture-écriture incluse dans l'installation.

2 - Les données sont calculées au début de chaque cycle par un bloc de calcul intégré à l'installation.

Si nous utilisons le premier procédé, considérant qu'un balayage de 2000 cm^{-1} peut être réalisé en 200 cycles, 400 données doivent être mémorisées ; ce qui représente une capacité de près de 8000 bits. Une telle mémoire est coûteuse et nécessite des circuits de commande complexes. Nous avons donc retenu le second procédé pour son prix de revient plus faible et la souplesse d'emploi qu'il apporte.

I.1 - Organisation générale

Les expressions déterminant Nq et Cq sont de la forme :

$$Nq = \frac{K_1}{\sigma_q}$$

et $$Cq = K_2 \cdot \sigma_q$$

où $$K_1 = X \cdot \frac{L}{e} \cdot \sigma_{Hi}$$

et $$K_2 = P\left(\frac{e}{L} \cdot \frac{1}{X \cdot \sigma_{Hi}} \cdot \frac{T}{\tau}\right)$$

sont des constantes dépendant des paramètres de l'installation. Nous remarquons que leur calcul nécessite au préalable celui de σ_q que nous pouvons écrire :

$$\sigma_q = \sigma_{q-1} + K_o$$

où $K_o = X . \Delta\sigma$

Le bloc de calcul doit donc comporter quatre éléments :

- un additionneur pour σ_q
- un diviseur pour Nq
- un multiplieur pour Cq
- un organe de contrôle.

I.2 - Organe de contrôle

La séquence de calcul, déduite de ce qui précède est représentée par l'organigramme de la figure IV.1.

L'organe de contrôle comprend (figure IV.2) :

- un compteur de phases
- un générateur de rythme.

Le compteur de phases est constitué par un compteur en anneau à 4 bits dont les sorties prennent tour à tour le niveau 1.

Le générateur de rythme est un multivibrateur muni de deux entrées d'inhibition. L'oscillation a lieu lorsque ces deux entrées sont au niveau 1.

Au début de la manipulation la séquence de calcul est déclenchée par une action sur un poussoir "RAZ" ; par la suite, le déclenchement a lieu lors de la montée en pression. Une opération est effectuée lorsque la sortie correspondante

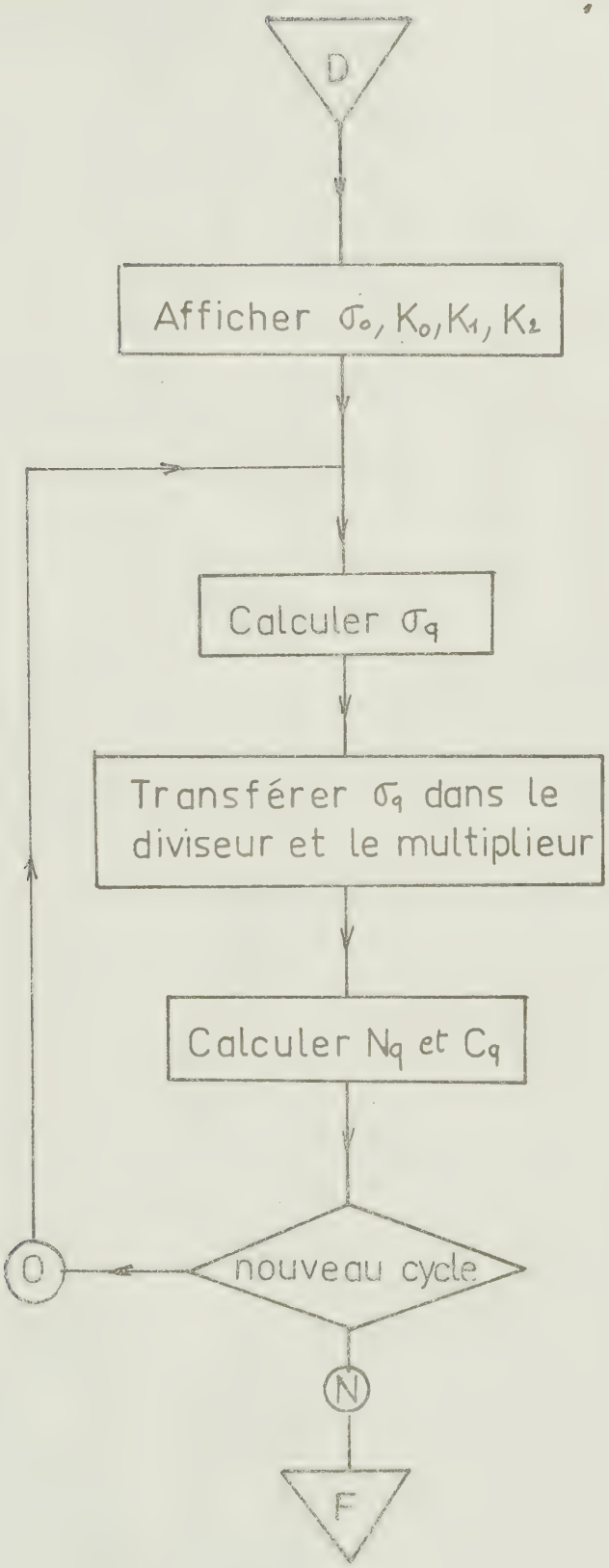

D
Afficher σ_o, K_o, K_1, K_2
Calculer σ_q
Transférer σ_q dans le diviseur et le multiplieur
Calculer N_q et C_q
nouveau cycle
O
N
F

figure IV 1

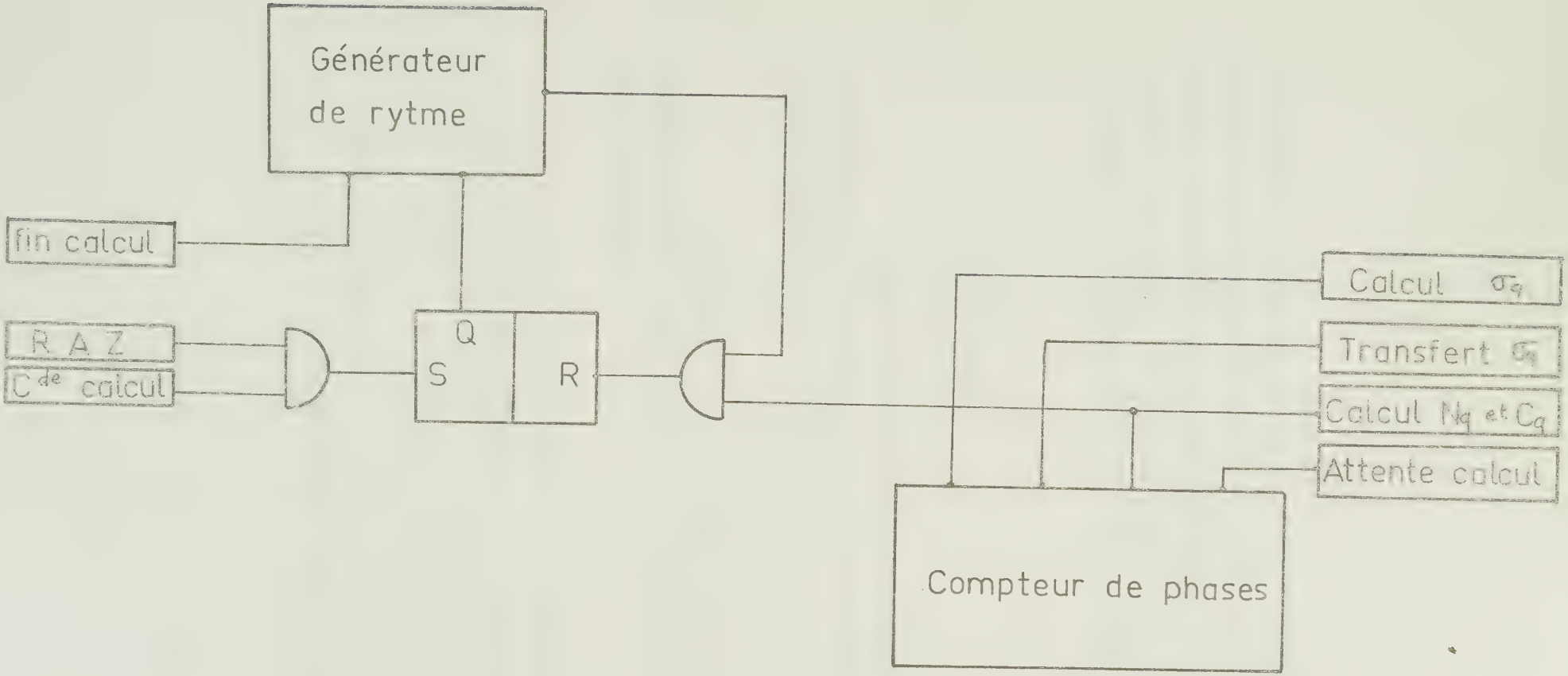

Générateur
de rytme
fin calcul
R A Z
C de calcul
Q
S
R
Calcul σq
Transfert σq
Calcul Nq et Cq
Attente calcul
Compteur de phases

figure IV 2

du compteur de phasesest au niveau 1. La fin de l'opération valide le générateur de rythme. Une impulsion est alors émise qui fait avancer le compteur de phases d'un rang. Après le calcul de Nq et Cq le générateur de rythme est inhibé jusqu'au prochain ordre de calcul et le compteur est bloqué sur la position "attente calcul". Les résultats sont alors disponibles sur les différents opérateurs.

I.3 - Additionneur

La valeur maximale de σ_q est de 22000 cm^{-1}, soit un nombre binaire de 15 bits. Pratiquement, du fait des circuits employés, nous sommes donc amenés à réaliser un additionneur à 16 bits.

Le schéma en est représenté par la figure IV.3. Nous y trouvons un ensemble de circuits additionneurs à 4 bits, associé à une mémoire constitué par des bascules type D.

Au début de la manipulation les valeurs décimales de K_o et σ_o sont affichées sur des roues codeuses qui réalisent la conversion binaire. L'ordre "RAZ" transfère σ_o dans la mémoire. Les circuits additionneurs effectuent alors la somme $\sigma_1 = \sigma_o + K_o$. L'ordre "calcul σ_q", provenant du compteur de phases, commande l'écriture de σ_1 en mémoire. Une nouvelle addition est alors effectuée : $\sigma_2 = \sigma_1 + K_o$, dont le résultat reste bloqué à l'entrée de la mémoire jusqu'au cycle suivant.

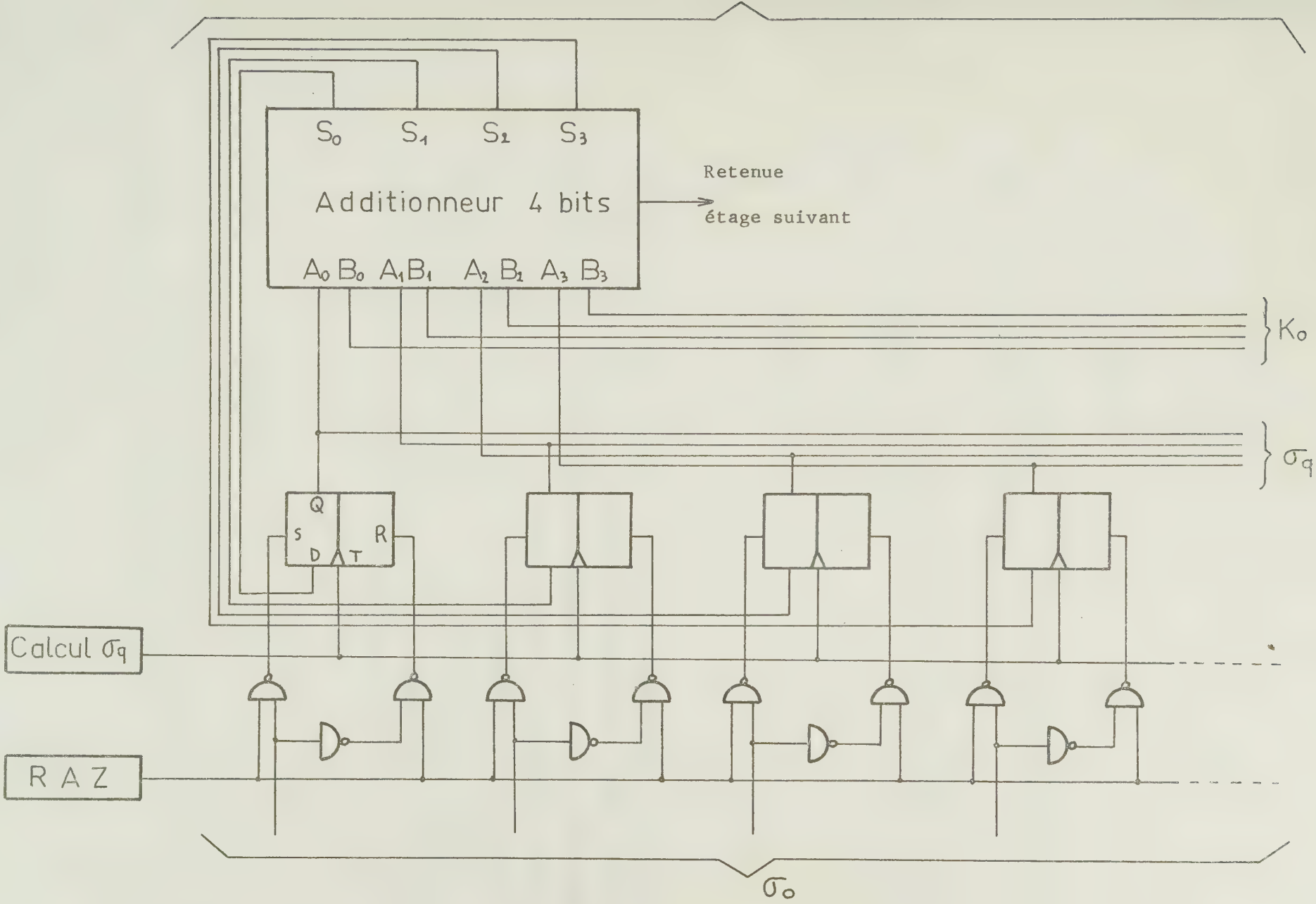

S0 S1 S2 S3
Additionneur 4 bits
Retenue
étage suivant
A0 B0 A1 B1 A2 B2 A3 B3
K0
σq
Q
S
R
D
T
Calcul σq
RAZ
σ0

figure IV-3

I.4 - Diviseur

Le principe adopté pour la réalisation du diviseur utilise des compteurs binaires prépositionnables munis d'une entrée d'inhibition.

Le schéma de l'opérateur est représenté par la figure IV.4. Nous y trouvons un ensemble de trois compteurs :

- un compteur dividende : C_1
- un compteur diviseur : C_2
- un compteur quotient : C_3

L'ordre "transfert σ_q" provenant du compteur de phases charge C_1 avec K_1, C_2 avec σ_q et remet à 0 C_3. L'horloge est déclenchée par l'ordre "Calcul Nq". Les impulsions sont alors décomptées simultanément par C_1 et C_2. Chaque fois que le contenu de C_2 passe à 0, un niveau 1 apparaît sur sa sortie M + m qui recharge C_2 et compte une impulsion sur C_3. Lorsqu'à son tour le contenu de C_1 passe à 0, le niveau 1 apparaîssant sur sa sortie M + m inhibe l'ensemble des compteurs et envoie une information "fin de calcul" permettant au compteur de phases d'avancer d'un pas. Le résultat est alors disponible sur C_3.

I.5 - Multiplieur

La réalisation du multiplieur est semblable à celle du diviseur. Nous y retrouvons (figure IV.5) un ensemble de trois compteurs :

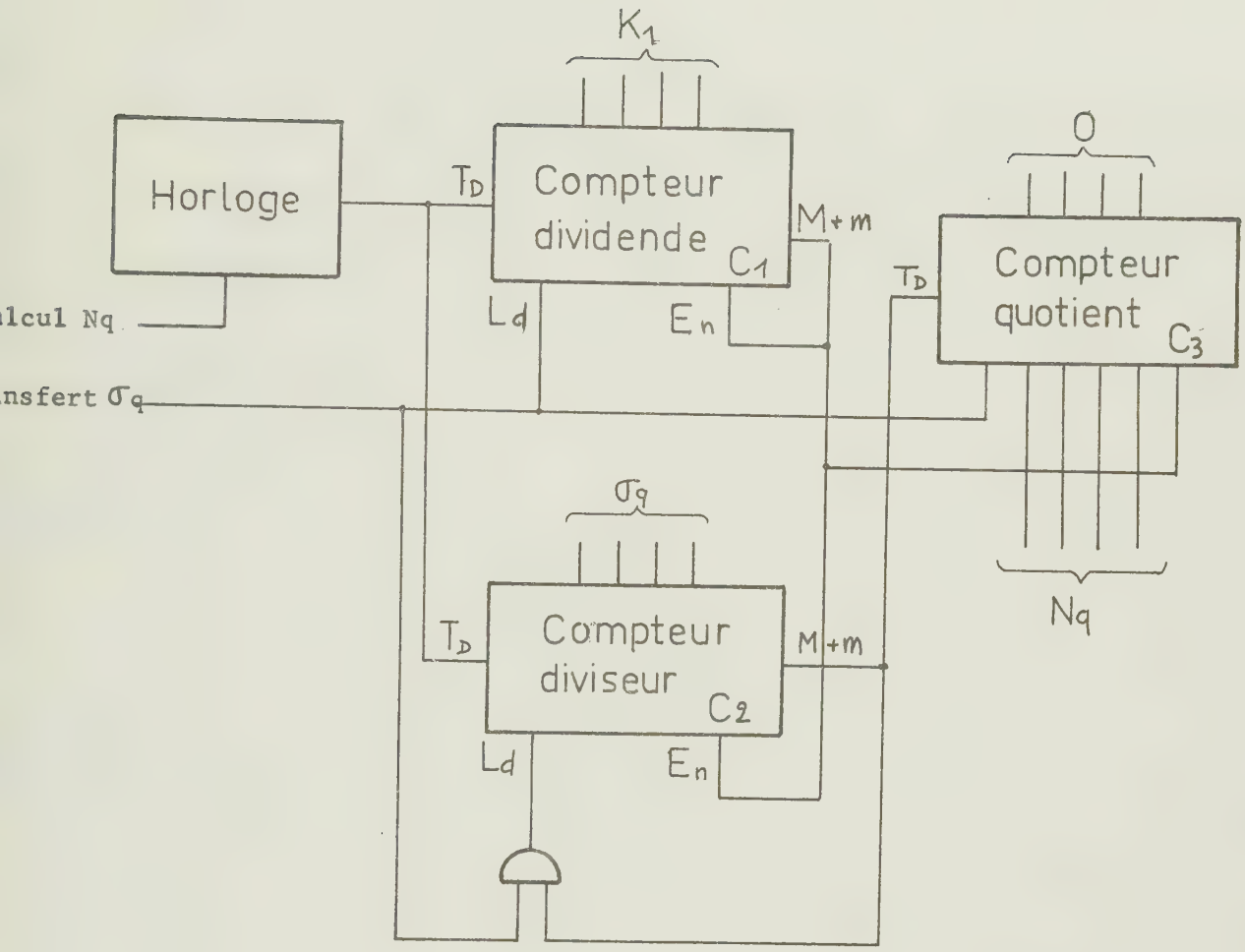

K1
Horloge
TD
Compteur
dividende
C1
M+m
Ld
En
0
TD
Compteur
quotient
C3
alcul Nq
nsfert σq
σq
TD
Compteur
diviseur
C2
M+m
Ld
En
Nq

figure IV 4

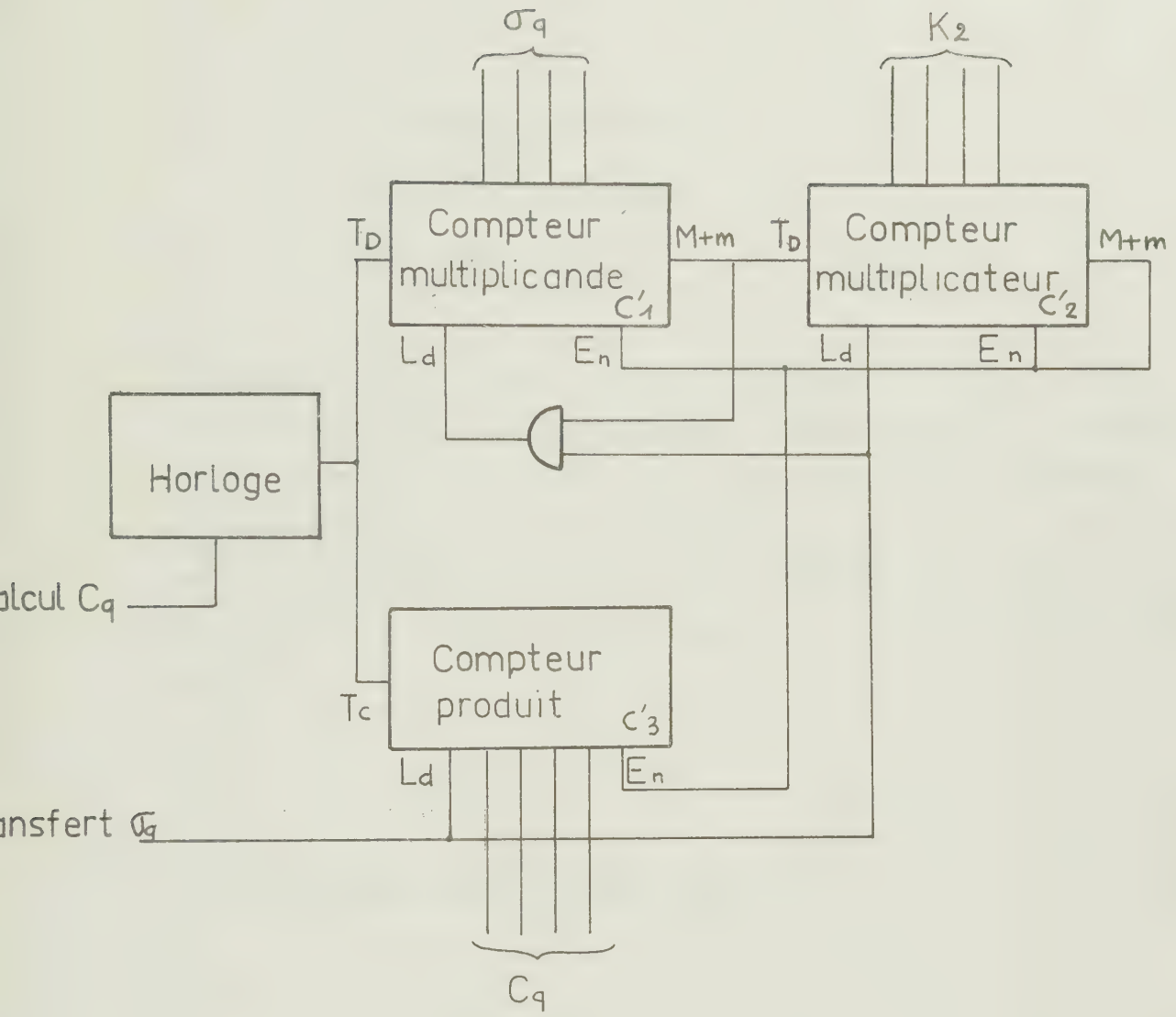

σ_q
K_2
Compteur multiplicande
C'_1
T_D
M+m
Ld
En
Compteur multiplicateur
C'_2
T_D
M+m
Ld
En
Horloge
Compteur produit
C'_3
Tc
Ld
En
C_q

figure IV - 5

- un compteur multiplicande : C'_1
- un compteur multiplicateur : C'_2
- un compteur produit : C'_3

L'ordre "transfert σ_q" charge C'_1 avec σ_q, C'_2 avec K_2 et C'_3 avec 0. A partir de "calcul Cq" les impulsions d'horloge sont décomptées par C'_1 et comptées par C'_3. Chaque fois que le contenu de C'_1 passe à 0, un niveau 1 apparaît sur M + m qui recharge C'_1 avec σ_q et décompte une impulsion sur C'_2. Lorsque le contenu de C'_2 devient nul les trois compteurs sont inhibés et une information "fin de calcul" est envoyée au compteur de phases. Le produit est alors disponible sur C'_3.

II - Repositionnement de la vanne en fin de cycle

II.1 - Justification

Au cours d'une phase de régulation, la pression dans la cellule diminuant, l'ouverture de la vanne augmente. Par suite, lorsque débute la phase de régulation suivante, si cette ouverture n'est pas modifiée, le débit d'azote est trop important et la période Michelson trop courte ; auquel cas, l'asservissement peut sortir du domaine de convergence. Pour écarter ce risque, nous avons prévu un dispositif qui repositionne la vanne à son ouverture initiale après la phase de régulation.

II.2 - Réalisation

Le principe de la réalisation consiste à déterminer le nombre de pas dont a tourné le moteur de la vanne au cours de la phase de régulation. A cet effet, les impulsions reçues par le compteur en anneau de la commande moteur sont totalisées par un compteur binaire réversible (figure IV.6) :

- une impulsion d'ouverture est comptée
- une impulsion de fermeture est décomptée.

A la fin de la phase de régulation, nous imposons au moteur une rotation du même nombre de pas, dans le sens de fermeture de la vanne. Ceci est réalisé en validant l'oscillateur Osc 1 de la correction proportionnelle, par une bascule mise à 1 lorsque le signal "Rég" passe de 1 à 0. Simultanément, un niveau 0 est appliqué à l'entrée "sens de rotation" du compteur en anneau du moteur, commandant la fermeture de la vanne. Le compteur binaire est donc progressivement vidé. Lorsque son contenu devient nul, la bascule de commande de l'oscillateur est mise à 0 inhibant ce dernier.

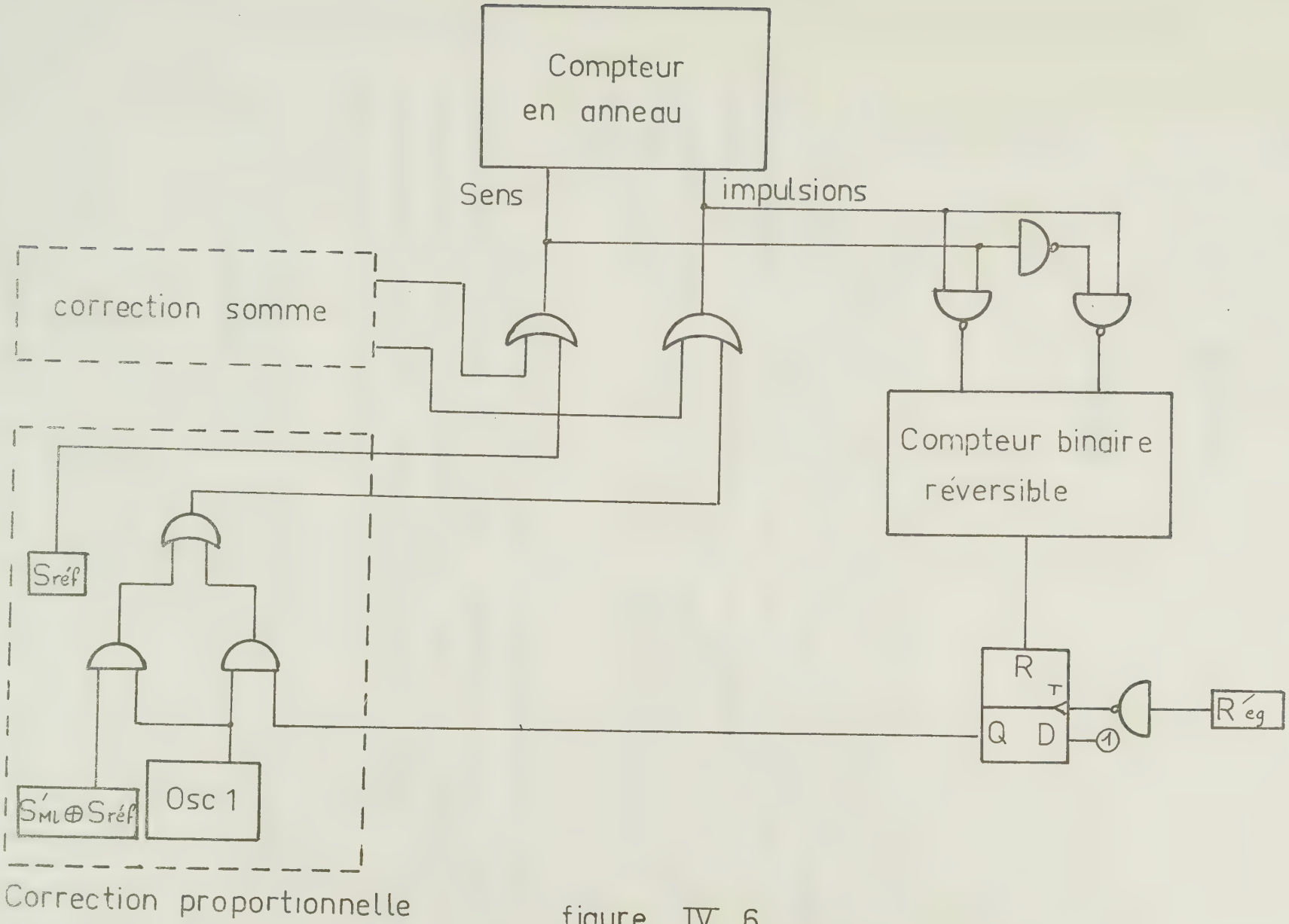

Compteur
en anneau
Sens
impulsions
correction somme
Compteur binaire
réversible
Sréf
R
T
Q D
1
R ég
SML ⊕ Sréf
Osc 1
Correction proportionnelle

figure IV 6

CHAPITRE V

RESULTATS

L'objectif que nous nous sommes fixés est la mise au point d'un asservissement contrôlant les variations de l'indice d'un gaz à l'intérieur d'une enceinte contenant le Fabry-Pérot. Celles-ci, résultant de variations de pression de plusieurs bars, nous assurent un balayage linéaire en fonction du temps, du nombre d'ondes transmis par le spectromètre. Le dépouillement d'un spectre, enregistré à vitesse constante, peut ainsi être effectué simplement. Les variations d'indice sont contrôlées par le défilement des franges d'un interféromètre de Michelson.

Voulant positionner une raie avec une précision de 5 mK, nous sommes conduits à détecter le 1/8e de frange. D'autre part, nous pouvons, sans introduire d'erreur décelable, utiliser pour chaque cycle, une loi linéaire de défilement des franges. Cette linéarisation est contrôlée par la période du signal Michelson qui doit être constante au cours d'un cycle.

L'ensemble des mesures présentées ci-après, permet d'apprécier la qualité de l'asservissement réalisé.

I - Technique de mesure de la linéarisation

Nous comparons le signal rectangulaire S'_{ni}, dérivé du signal Michelson S_{ni}, à un signal carré S'réf dont la largeur d'un créneau est égale à la période de référence Tréf.

A chaque front de l'un des signaux S'_{ni} ou S'réf (figure V.1) il correspond le passage d'une frange réelle ou idéale. L'écart par rapport à la linéarisation est mesuré par l'intervalle de temps entre deux fronts de même indice. Ainsi que nous l'avons vu au chapitre III, cet écart correspond à Σ (T'réf - T_{ni}) que nous désignerons par Δ. Son signe est positif si S'_{ni} est en avance par rapport à S'réf.

Afin de pouvoir déterminer cet écart à chaque frange, nous avons automatisé l'acquisition des données par l'emploi d'une centrale de mesures connectée à une perforatrice de bandes. Ainsi enregistrés, les résultats peuvent être rapidement traités sur ordinateur.

Le schéma d'ensemble du dispositif de mesure est représenté par la figure V.2. Le signal d'écart S'_{ni} + S'réf valide un oscillateur de fréquence 1 k Hz lorsqu'il est au niveau 1. Les impulsions produites sont enregistrées par un compteur binaire. En fin de mesure, un ordre de lecture est transmis à la centrale des mesures. Le signal de retour "fin de mesure" remet le compteur binaire à 0. L'ensemble est alors prêt pour la mesure suivante.

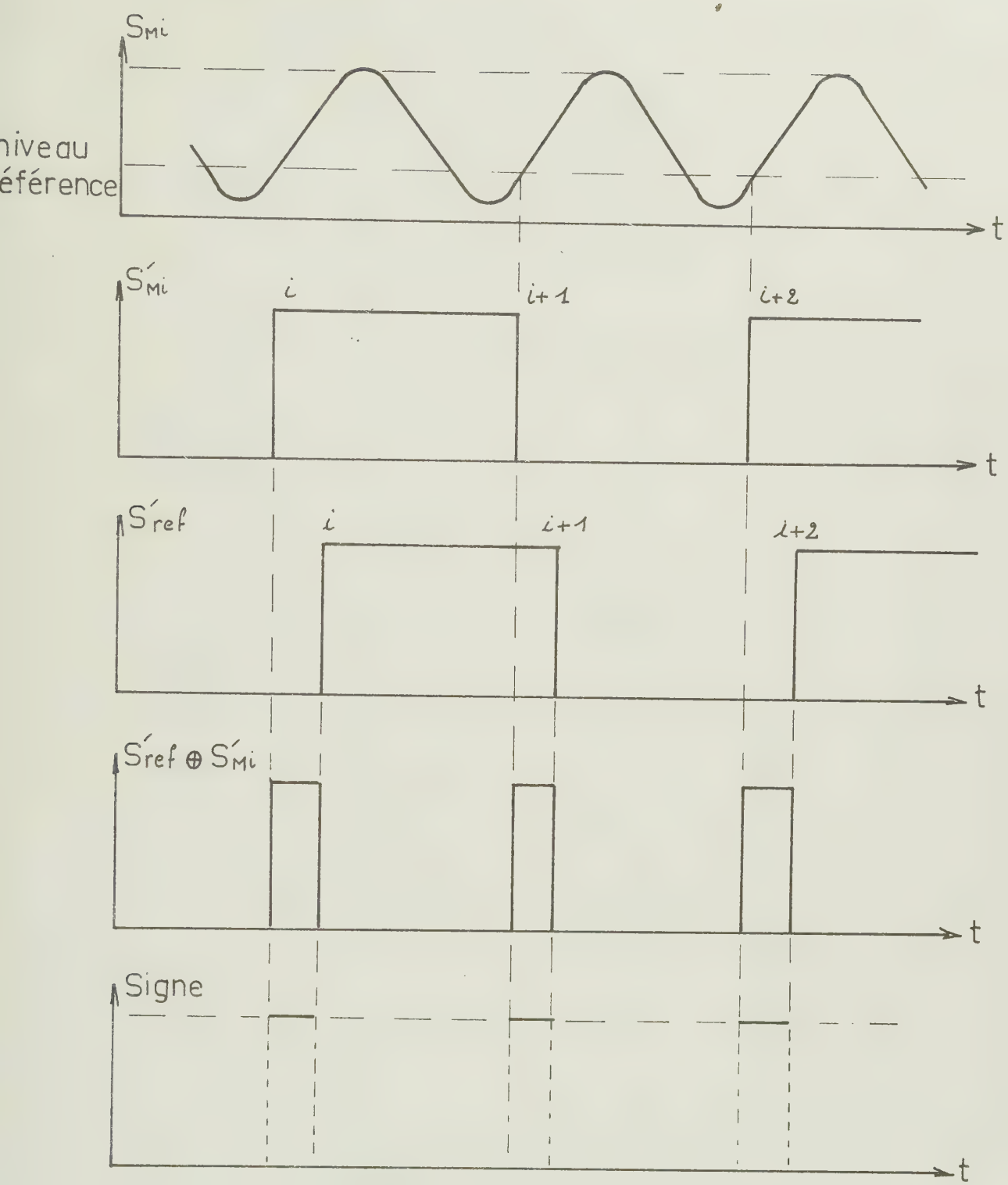

S_{Mi}
niveau
éférence
t
S'_{Mi}
i
i+1
i+2
t
S'_{ref}
i
i+1
i+2
t
$S'_{ref} \oplus S'_{Mi}$
t
Signe
t

figure V 1

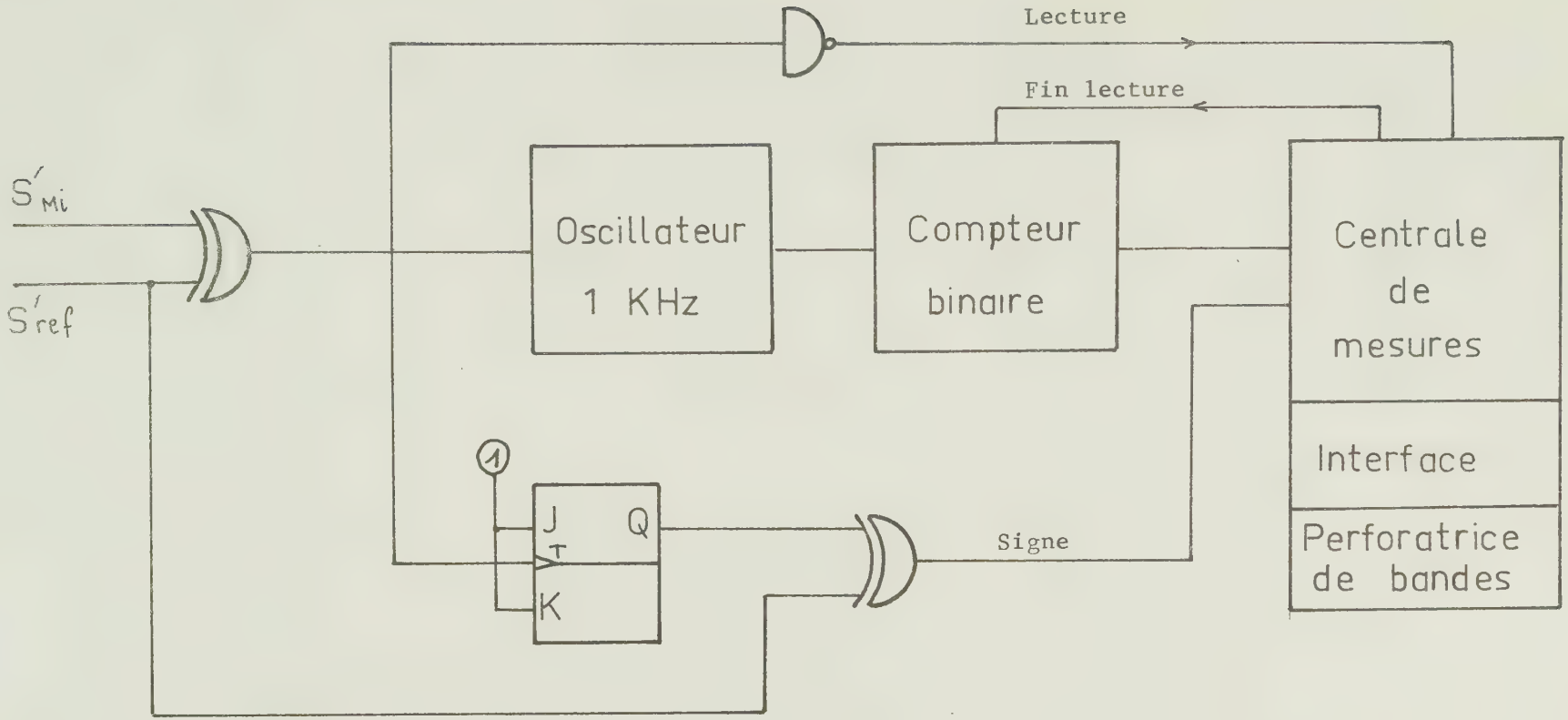

Lecture
Fin lecture
S'Mi
S'ref
Oscillateur
1 KHz
Compteur
binaire
Centrale
de
mesures
Interface
Perforatrice
de bandes
1
J
Q
K
Signe

figure V 2

II - Contrôle de la linéarisation

II.1 - Cycles de mesures

Le règlage des actions proportionnelle et somme de l'asservissement a nécessité une série de cycles identiques. A cet effet nous avons remplacé le bloc de calcul par une programmation fixe établissant un balayage de 200 franges avec une période de 5000,00 ms.

Des essais systématiques nous ont permis de déterminer les fréquences optimales des oscillateurs Osc 1 et Osc 2 des corrections proportionnelle et somme. Ces fréquences sont définies comme étant celles qui donnent la période moyenne la plus proche de la période de référence avec la plus faible dispersion des valeurs. Les principaux résultats sont rassemblés sur la figure V.3. Les règlages définitifs sont les suivants :

- Osc 1 : 40 Hz
- Osc 2 : 50 Hz.

II.2 - Linéarisation locale

Une première série de manipulations a été effectuée en supprimant la correction somme. A partir des mesures de Δ nous avons calculé la période du signal Michelson, d'après la relation :

$$T_{Mi}{}_{i} = Tréf + \Delta_{i-1} - \Delta_{i}$$

f Osc 1	f Osc 2	moyenne	écart type
70	70	divergence	/
70	60	divergence	/
60	70	divergence	/
60	60	5000,14	16,3
50	70	5000,11	105
50	60	5000,16	18,9
50	50	5000,14	14,9
40	70	5000,15	330
40	60	5000,12	18,1
40	50	5000,06	12,4
40	40	5000,21	11,2
33	33	5000,36	12,9

figure V-3

Le tableau I donne l'ensemble de ces valeurs exprimées en ms. L'étude de ces résultats fait apparaître une période moyenne qui ne s'écarte que de 1,5 ‰ de la période de référence. La répartition des valeurs est assez serrée puisque l'écart type de 16,4, représente 3,2 ‰ de la valeur moyenne. Toutefois, l'examen du tableau II, donnant les valeurs de Δ, fait apparaître deux choses :

- un accroissement de Δ faible, mais régulier
- une valeur finale de Δ importante.

A partir de ces données, nous avons calculé une définience d'après la relation suivante :

$$D = \frac{\text{nombre de franges} \times \text{période de référence}}{\Delta}$$

soit, numériquement :

$$D = \frac{200 \times 5000}{\Delta \ (\text{ms})}$$

La valeur moyenne de la définience correspond à un écart de 5 mK entre les valeurs réelle et idéale de σ. Toutefois, les valeurs de Δ augmentant au cours d'un cycle, il est préférable d'examiner la définience maximum qui correspond à un écart de 8 mK.

La correction proportionnelle nous donne donc une bonne linéarisation locale, c'est-à-dire d'une période à la suivante, mais les résultats ne sont pas compatibles avec la précision que nous nous sommes fixée et mettent en évidence la nécessité d'une correction somme.

PERIØDES MICHELSØN

4999	5078	4974	4966	5028
5038	4995	4992	4997	5007
5013	5020	4995	4997	5004
5012	4995	4993	5000	5003
5021	5023	5001	5004	5008
5003	5030	5025	5006	4986
5060	5033	5017	5001	5008
4995	5044	5026	5009	5011
4996	4996	4991	5019	4983
4999	5000	5002	5014	5026
4999	5003	5010	5012	4997
4997	5003	5004	5021	5024
5001	5003	5012	5021	4994
5013	4986	4991	4990	5043
4996	4970	5056	5056	4982
4976	5015	5023	5005	5007
5014	5022	5002	5007	5011
5018	5001	5004	5051	5001
5041	5029	4982	4982	5010
5020	5005	4994	5032	5022
4994	5023	4985	4989	5028
5031	4992	4989	5018	5030
4987	4981	5028	5032	4993
4991	5019	5030	4988	4989
5018	5017	5021	5019	4997
5001	5006	5013	4998	4999
5007	5013	5002	5002	5009
5020	4994	5002	5009	5013
5003	5002	5010	5018	5002
5005	5005	5027	5003	5000
5020	5016	4994	5020	4990
4990	5018	5031	4991	4994
5000	5011	4991	4996	5001
5011	4992	4997	5002	5012
4993	5000	5007	5013	5000
5004	5010	5018	4987	5019
4988	4992	4999	5012	4991
4999	5004	5012	4994	5001
5005	5012	4999	5008	5006
5022	4998	5007	5013	5020

VALEUR EXTREME : 5078
VALEUR MØYENNE : 5007.31
ECART TYPE : 16.4

tableau I

1	-77	-51	-17	-45
-83	-78	-70	-67	-74
-87	-107	-102	-99	-103
-115	-110	-103	-103	-106
-127	-150	-151	-155	-163
-166	-196	-221	-227	-213
-273	-306	-323	-324	-332
-327	-371	-397	-406	-417
-413	-409	-400	-419	-402
-401	-401	-403	-417	-443
-442	-445	-455	-467	-464
-461	-464	-468	-489	-513
-514	-517	-529	-550	-544
-557	-543	-534	-524	-567
-563	-533	-589	-645	-627
-603	-618	-641	-646	-653
-667	-689	-691	-698	-309
-727	-728	-732	-783	-784
-825	-854	-836	-818	-828
-848	-853	-847	-879	-901
-895	-918	-903	-892	-920
-951	-943	-932	-950	-980
-967	-948	-976	-1008	-1001
-992	-1011	-1041	-1029	-1018
-1036	-1053	-1074	-1093	-1090
-1091	-1097	-1110	-1108	-1107
-1114	-1127	-1129	-1131	-1140
-1160	-1154	-1156	-1165	-1178
-1181	-1183	-1193	-1211	-1213
-1218	-1223	-1250	-1253	-1253
-1273	-1289	-1283	-1303	-1293
-1283	-1301	-1332	-1323	-1317
-1317	-1328	-1319	-1315	-1316
-1327	-1319	-1316	-1318	-1330
-1323	-1323	-1330	-1343	-1343
-1347	-1357	-1375	-1362	-1381
-1369	-1361	-1360	-1372	-1363
-1362	-1366	-1378	-1372	-1373
-1378	-1390	-1389	-1397	-1403
-1425	-1423	-1430	-1443	-1463

DEFINIENCE MINIMUM : 600
DEFINIENCE MØYENNE : 1000

tableau II

II.3 - Linéarisation sur un cycle.

Ayant rebranché la correction somme, nous avons effectué une nouvelle série de manipulation.

Le tableau III donne les valeurs de la période Michelson, calculée comme précédemment et exprimée en ms. La comparaison avec le tableau I met en évidence une valeur moyenne plus proche de la période de référence et une répartition plus serrée des résultats ; l'écart type de 12,4 ne représente que 2,4 ‰ de la valeur moyenne.

Le tableau IV rassemble les valeurs de Δ ; celles-ci, comprises entre deux valeurs extrêmes, sont tantôt positives, tantôt négatives, montrant le rôle des corrections proportionnelle et somme. La définience moyenne est multipliée par 50 par rapport au cas précédent ; ceci correspond à un écart moyen de 0,1 mK entre les valeurs réelle et idéale de σ.

PERIØDES MICHELSØN

4999	5014	5005	4995	4998
4993	5000	5009	4998	4991
4997	5014	5005	4995	4998
4993	5000	5009	4998	4991
5015	5011	4998	4967	5013
5026	5018	4970	5006	4989
5007	5009	4995	4963	5006
5024	5019	4966	5007	5012
5002	4967	5007	5024	5016
4971	5009	5008	5012	4977
4991	5003	5013	4987	5011
5007	5011	4983	4989	4993
5000	5008	5021	4994	4999
4976	5000	5012	5012	4984
5001	5006	5009	4998	4995
4990	5016	4991	4995	4992
5001	5012	5009	4973	5004
5012	5012	4986	4999	5011
4998	4984	5019	4991	4995
4995	5007	5007	5008	4988
5012	4998	5002	4975	5003
5021	5010	4984	5007	4991
5018	4992	4999	4985	5000
5012	4998	4983	5019	4991
4997	5001	5009	5003	5014
4979	4994	5001	5008	5006
5013	4976	4995	4994	5012
5003	5013	4991	5016	4985
5006	4984	5012	4993	5000
4999	5008	4992	4998	4995
5000	5007	5013	4986	5009
4994	5000	5000	5010	4990
5015	4995	5003	4987	5012
4991	5016	4987	5007	4988
5013	4996	5007	4973	5010
5012	5007	4970	5002	5008
5016	4999	5005	4975	4997
4999	5008	5003	5017	4980
5002	5002	5014	4979	5002
5000	5009	5001	4999	4993
4997	4999	5007	5002	5015
4992	4995	4978	5005	5003

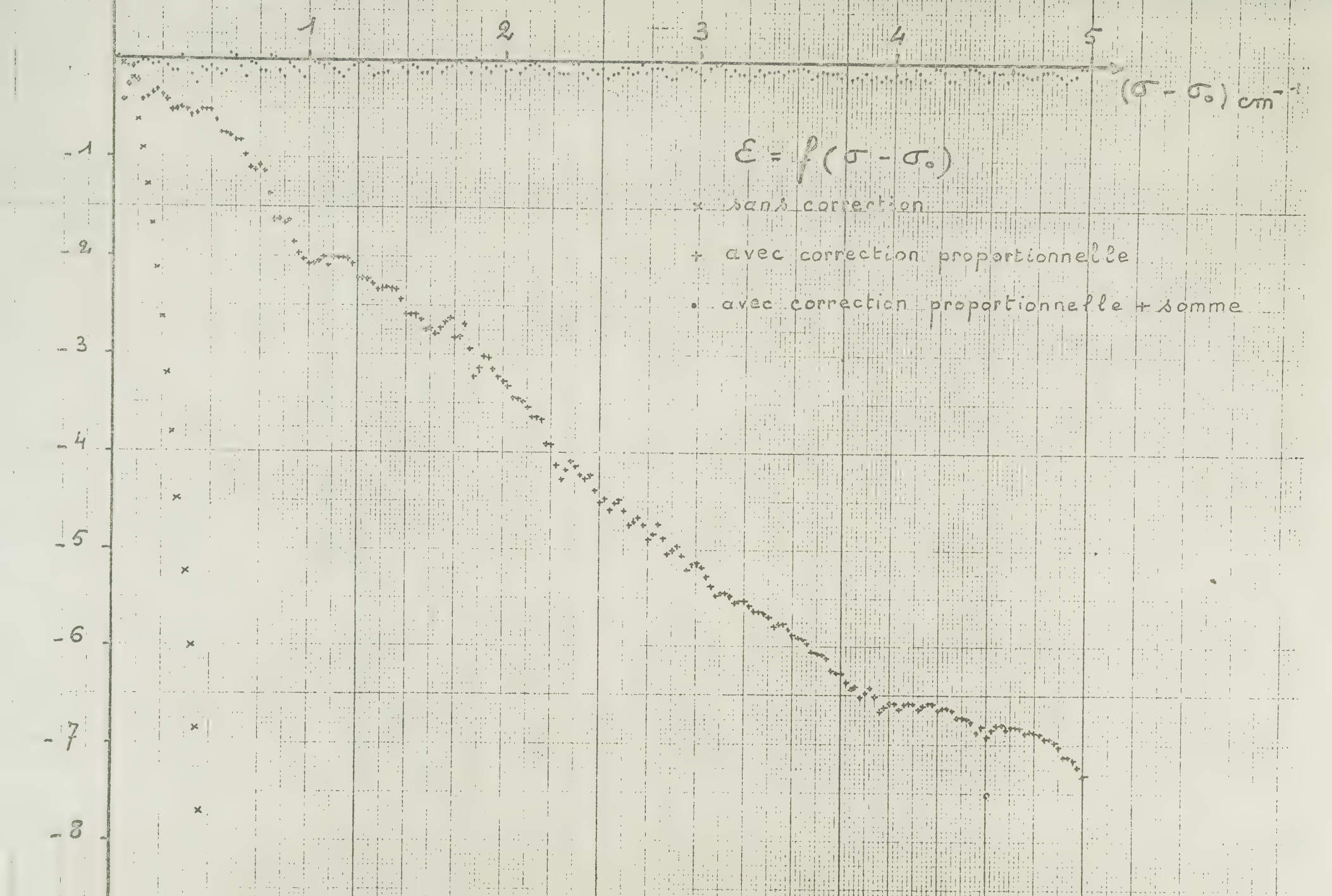
VALEUR EXTREME : 4963
VALEUR MØYENNE : 5000.06
ECART TYPE : 12.4

tableau III

+001 *	-013 *	-018 *	-013 *	-011 *
-004 *	-004 *	-013 *	-011 *	-002 *
-017 *	-028 *	-026 *	+007 *	-006 *
-032 *	-050 *	-020 *	-026 *	-015 *
-022 *	-031 *	-026 *	+011 *	+005 *
-019 *	-038 *	-004 *	-011 *	-023 *
-025 *	+008 *	+001 *	-023 *	-039 *
-010 *	-019 *	-027 *	-039 *	-016 *
-007 *	-010 *	-023 *	-010 *	-021 *
-028 *	-039 *	-022 *	-011 *	-004 *
-004 *	-012 *	-033 *	-027 *	-026 *
-002 *	-002 *	-014 *	-026 *	-010 *
-011 *	-017 *	-026 *	-024 *	-019 *
-009 *	-025 *	-016 *	-011 *	-003 *
-004 *	-016 *	-025 *	+002 *	-002 *
-014 *	-026 *	-012 *	-011 *	-022 *
-020 *	-004 *	-023 *	-014 *	-009 *
-004 *	-011 *	-018 *	-026 *	-014 *
-026 *	-024 *	-026 *	-001 *	-004 *
-025 *	-035 *	-019 *	-026 *	-017 *
-035 *	-027 *	-026 *	-011 *	-011 *
-023 *	-021 *	-004 *	-023 *	-014 *
-011 *	-012 *	-021 *	-024 *	-038 *
-017 *	-011 *	-012 *	-020 *	-026 *
-039 *	-015 *	-010 *	-004 *	-016 *
-019 *	-032 *	-023 *	-039 *	-024 *
-030 *	-014 *	-026 *	-019 *	-019 *
-018 *	-026 *	-018 *	-016 *	-011 *
-011 *	-018 *	-031 *	-017 *	-026 *
-020 *	-020 *	-020 *	-030 *	-020 *
-035 *	-030 *	-033 *	-020 *	-032 *
-023 *	-039 *	-026 *	-033 *	-021 *
-034 *	-030 *	-037 *	-010 *	-020 *
-032 *	-039 *	-009 *	-011 *	-019 *
-035 *	-034 *	-039 *	-014 *	-011 *
-010 *	-018 *	-021 *	-038 *	-018 *
-020 *	-022 *	-036 *	-015 *	-017 *
-017 *	-026 *	-027 *	-026 *	-019 *
-016 *	-015 *	-022 *	-024 *	-039 *
-031 *	-026 *	-004 *	-009 *	-012 *

DEFINIENCE MINIMUM : 21000
DEFINIENCE MØYENNE : 56000

tableau IV


1
2
3
4
5
$(\sigma - \sigma_0)\ cm^{-1}$
$\varepsilon = f(\sigma - \sigma_0)$
× sans correction
+ avec correction proportionnelle
• avec correction proportionnelle + somme
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8

Nous devions réaliser un dispositif capable d'assurer le déplacement en synchronisme de la bande passante d'un interféromètre Fabry-Pérot et d'un monochromateur à réseau. La méthode que nous avons choisie, linéariser l'exploration du Fabry-Pérot en asservissant les variations de pression dans l'enceinte, présente l'avantage d'être facilement réalisable, puisque des fuites de bonne linéarité existent dans le commerce. Cependant, l'exploration d'un domaine de plusieurs milliers de cm^{-1}, avec une vitesse d'enregistrement compatible avec la haute résolution recherchée, exige un balayage en dents de scie. Le repositionnement correct de la bande passante du Fabry-Pérot nécessite un double interféromètre de Michelson. Le comptage des franges, avec la précision du huitième de frange, associé à leur sens de défilement nous permet de contrôler l'amplitude et les inversions des variations de pression. Simultanément nous avons prévu un bloc de calcul qui nous permet de choisir les paramètres de l'enregistrement : nombre d'ondes de départ, vitesse d'exploration, et règle l'asservissement en conséquence.

L'ensemble réalisé, utilise les techniques digitales. Son fonctionnement satisfaisant devrait nous permettre de construire trois spectromètres de haute résolution : un spectromètre d'absorption dans le domaine 40000 à 50000 cm^{-1}, un spectromètre Raman-laser dans le visible et un spectromètre d'émission dans le visible, utilisant un étalon de Fabry-Pérot achromatique.

ANNEXE 1

ENTRAINEMENT DU RESEAU

Le nombre d'ondes de la radiation transmise par le réseau s'écrit :

$$\sigma_R = \frac{p_R}{2u \cdot \sin\beta} \cdot \frac{1}{\sin\alpha}$$

où : p_R : ordre d'interférence

u : pas du réseau

α : angle de la normale au réseau avec l'axe du spectromètre.

β : angle d'un rayon incident ou diffracté avec l'axe du spectromètre.

Un balayage de σ_R linéaire par rapport au temps nécessite un dispositif d'entraînement tel que :

$$\frac{d\,\sigma_R}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{\sin\alpha}\right) = C^{te}$$

Ce dispositif est représenté par la figure A1.

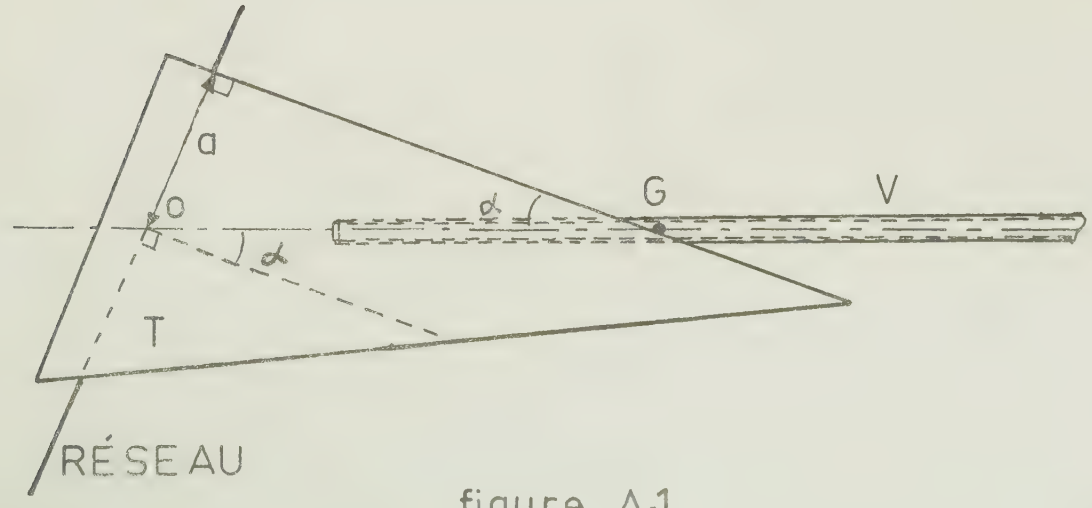


figure A-1

Le réseau R, mobile autour d'un axe passant par 0, est solidaire d'une pièce triangulaire T. Un chariot, mu par une vis micrométrique V, porte un galet G maintenu en appui contre la pièce T.

Soient : h : pas de la vis

ω : vitesse angulaire de la vis en rd/s

D'après la figure, nous avons :

$$\frac{l}{\sin \alpha} = \frac{x}{a}$$

or : $x = x_o + h \cdot \frac{\omega . t}{2\pi}$

(x_o : valeur de x au temps t = o)

d'où finalement :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{l}{\sin \alpha}\right) = \frac{h.\omega}{2\pi.a} + \frac{h.t}{2\pi.a}\,\frac{d\omega}{dt}$$

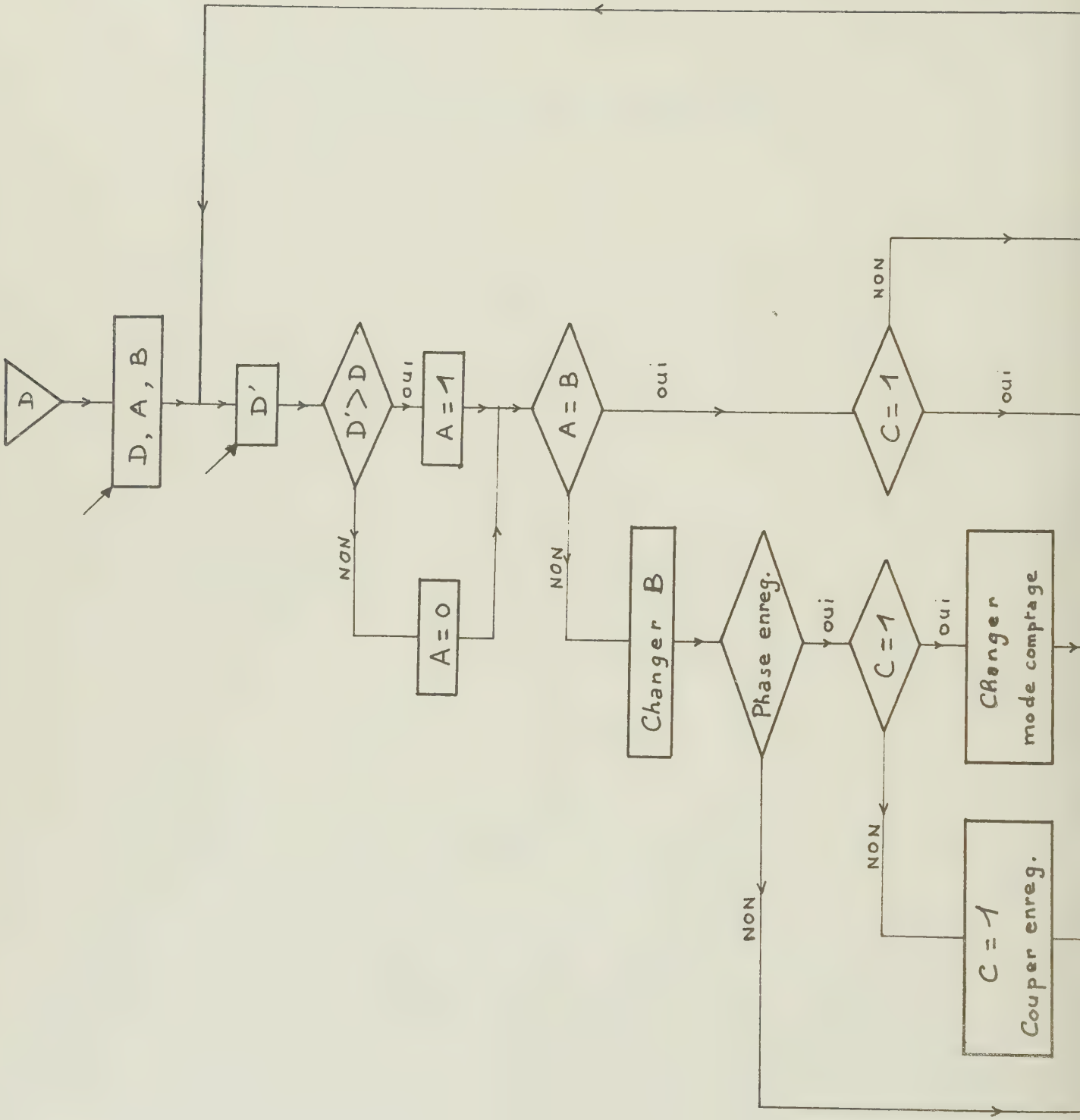
La condition $\frac{d}{dt}\left(\frac{l}{\sin \alpha}\right)$ est remplie en prenant $\omega = C^{te}$. Ceci est réalisé en entraînant la vis par un moteur pas à pas commandé par un oscillateur à faible dérive.

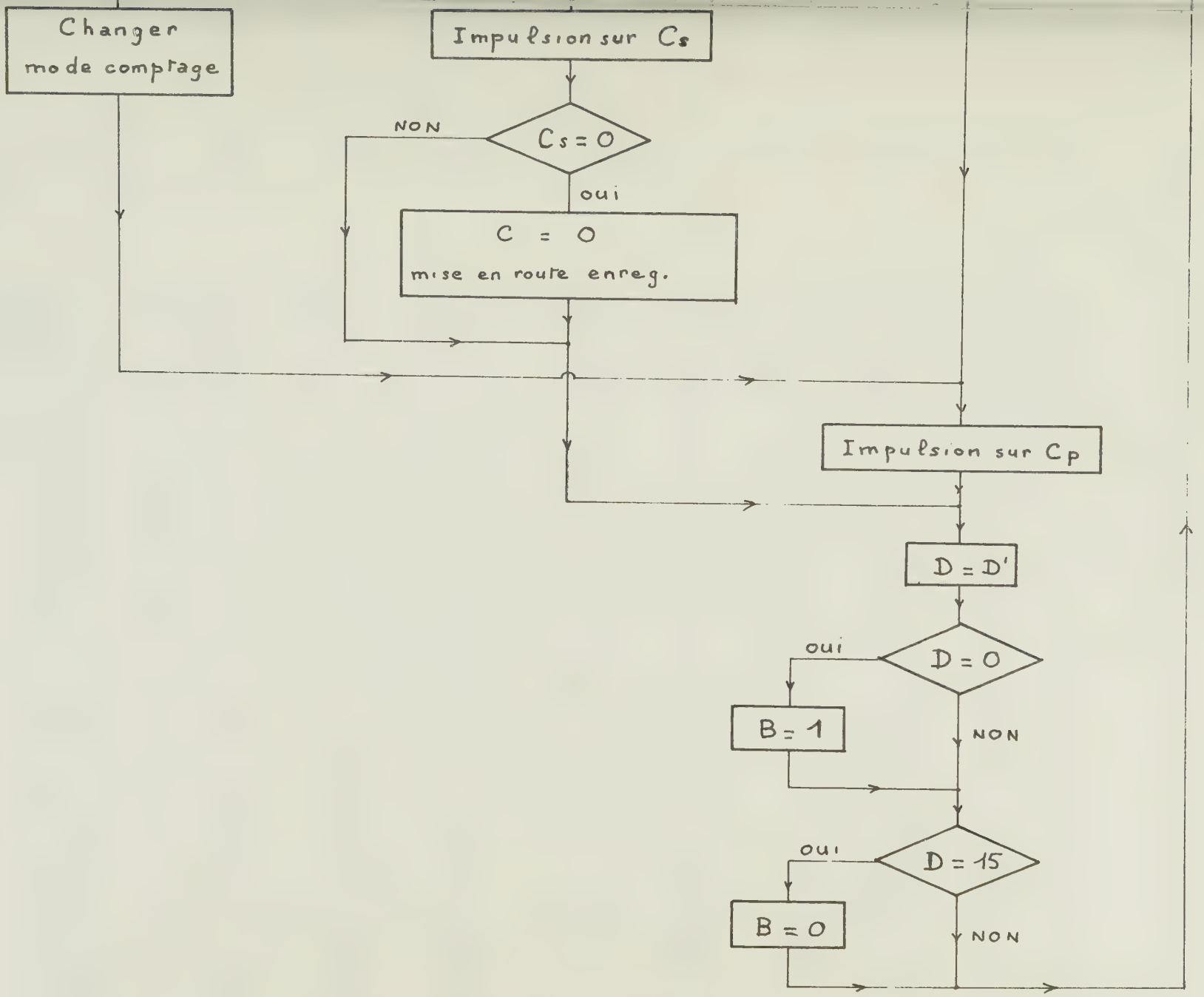
ANNEXE 2

SELECTION DES MODES DE COMPTAGE

Le choix du mode de comptage est effectué en comparant deux mots binaires (formés par la sortie des détecteurs de niveau) consécutifs. A cet effet un mot binaire est recopié dans une mémoire ; soit D ce mot. Le basculement d'un des détecteurs de niveau constitue un nouveau mot binaire D'. La comparaison de D' avec D permet de sélectionner, d'une part le compteur utilisé, d'autre part son mode de comptage.

L'organigramme de ces opérations est représenté ci-après. Les lettres A, B, C y figurant, désignent des signaux ; Cp et Cs, respectivement le compteur principal et le compteur secondaire.


D
D, A, B
D'
D'>D
oui
NON
A=1
A=0
A=B
oui
NON
C=1
oui
NON
Changer B
Phase enreg.
oui
NON
C=1
oui
NON
Changer mode comptage
C=1 Couper enreg.


Changer
mode comptage
Impulsion sur Cs
NON
Cs = 0
oui
C = 0
mise en route enreg.
Impulsion sur Cp
D = D'
oui
D = 0
B = 1
NON
oui
D = 15
B = 0
NON

BIBLIOGRAPHIE

(1) M. CUISENIER et J. PINARD : Spectromètre de Fourier à "oeil chat" et à balayage rapide.
Colloque sur les méthodes nouvelles de spectroscopie instrumentale.
Journ. Phys., 28 sup. C 2 (1967), 97-104.

(2) P. JACQUINOT : progrès récents en spectroscopie interférentielle.
Proceedings of the conference on photographic and spectroscopic optics, Tokio (1964) Jap. Journ. Appl. Phys., 4 sup. 1 (1965), 401-411.

(3) D.J. BRADLEY : Parallel movement for high finesse interferometric scanning.
Journ. Scient. Instr., 39 (1962), 41-45.

(4) R. CHABBAL et M. SOULET : dispositif permettant le déplacement mécanique d'une lame de F.P. Journ. Phys. Radium, 19 (1958), 274-277.

(5) J.P. LAUDE : Spectromètre à deux F.P. asservis.
Colloque sur les méthodes nouvelles de spectroscopie instrumentale.
Journ. Phys., 28 sup C2 (1967), 322-325.

(6) R. CHABBAL : Thèse Paris (1957).

(7) R. DUPEYRAT : Etude de procédés électriques de balayage pour des interféromètres enregistreurs.
Journ. Phys. Radium, 19 (1958), 290-292.

(8) J.V. RAMSAY : a rapid seanning F.P. interferometer with automatic parallelism control.
Appl. Opt., 1 (1962), 411-413.

(9) G. HENDERSON, H.T. BETZ et P.N. SLATER : Application of the prism F.P. in solar physics and airglow.
Colloque sur les méthodes nouvelles de spectroscopie instrumentale. Journ. Phys., 28 sup C2 (1967) 287-288.

(10) P.N. SLATER, H.T BETZ, G. HENDERSON : a new design of a seanning F.P interferometer. Proceedings of the conference on photographic and spectroscopic optics, Tokio (1964) Jap. Journ. Appl. Phys., 4 sup 1 (1965), 440-444

(11) D. DRUMOND and A. GALLAPHER : a low resolution scanning multiple F.P. spectrometer.
Review of scientific instruments, vol. 44 n° 4 april 1973, 396-399.

(12) J. BLAISE : description du spectromètre F.P. enregistreur de Bellevue
Journ. Phys. Radium, 19 (1958), 335-337.

(13) H. CHANTREL : Spectromètres interférentiels de haute résolution à un ou deux étalons de F.P.
Journ. Rech. Cent. Nat. Rech. Scient., 46 (1959), 17-33.

(14) J. KUHL, A. STENDEL et H. WALTER : a recording double F.P. spectrometer.
Colloque sur les méthodes nouvelles de spectroscopic instrumentale.
J. Phys., 28 sup. C2 (1967), 322-325.

(15) J.M. HELBERT : contribution à l'étude du déplacement isotopique relatif dans les spectres des terres rares.
Thèse Orsay (1969).

(16) R. CHABBAL et P. JACQUINOT : Revue d'optique 40, 157 (1961)

(17) International critical tables : refractivity gases.

(18) H.T. DUONG, S. GERSTENKORN, J.M. HELBERT :
Revue physique appliquée T2, 249 (1967)